



Diogo Alexandre Antunes Machado

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de impressora 3D para caracterização dos efeitos de parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PEEK

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Marco Leite, Professor Auxiliar, Instituto
Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Co-Orientadores: Professor Doutor António Mourão, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Professor Doutor Ricardo Cláudio, Professor Adjunto, Escola Superior
de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal

Diogo Alexandre Antunes Machado

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de impressora 3D para
caracterização dos efeitos de parâmetros de
impressão nas propriedades mecânicas do PEEK**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Marco Leite, Professor Auxiliar, Instituto
Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Co-Orientadores: Professor Doutor António Mourão, Professor
Associado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Professor Doutor Ricardo Cláudio, Professor Adjunto, Escola Superior
de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal

Setembro 2019

Desenvolvimento de impressora 3D para caracterização dos efeitos de parâmetros de impressão nas propriedades mecânicas do PEEK

Copyright © Diogo Alexandre Antunes Machado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Uma nota de agradecimento ao meu orientador, o professor Marco Leite, pela oportunidade concedida para a realização do estudo com um material recente e inovador na área da impressão 3D, assim como pela sua constante colaboração neste trabalho.

Ao professor Ricardo Cláudio, que me tão bem me acolheu no Instituto Politécnico de Setúbal, um agradecimento especial pela ajuda fornecida, disponibilidade e colaboração contínua na realização deste trabalho.

Uma nota de agradecimento ao professor Manuel Ferreira do Instituto Politécnico de Setúbal pela ajuda na realização dos circuitos elétricos e eletrónicos, ao Engº Gonçalo Torres, técnico do laboratório de Mecânica de Materiais pela ajuda nos ensaios de tração e na disponibilização de material necessário à construção da impressora.

Gostaria de agradecer ao Laboratório para Desenvolvimento de Produto do Instituto Superior Técnico, na pessoa do professor Marco Leite, pelo contributo financeiro na aquisição de materiais e equipamentos necessários à realização desta tese de mestrado. Igual nota para o InnovationLab do Instituto Politécnico de Setúbal, na pessoa do professor Ricardo Cláudio também pela aquisição de material, cedência de espaço e ferramentas.

Por último, um obrigado à família e amigos pelo apoio constante.

Um bem-haja a todos.

Resumo

O Poli-éter-éter-cetona (PEEK) é um dos polímeros termoplásticos com melhores características mecânicas, aliadas a uma elevada resistência química e ao calor. É dos materiais mais avançados para impressão 3D pelo método FFF permitindo uma ampla gama de aplicações na área de algumas engenharias.

Esta dissertação tem como objetivo caracterizar o efeito dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do PEEK. Para tal foram produzidos provetes em PEEK recorrendo à técnica de FFF em duas impressoras diferentes com o objetivo de comparar resultados. Para a impressão foi necessário adequar uma impressora 3D desenvolvida no Instituto Politécnico de Setúbal (IPS), introduzindo modificações como a construção de uma câmara quente, a alteração da cabeça de impressão, do extrusor e do *hotend*. Posteriormente utilizou-se uma impressora comercial para comparação de resultados.

Para a otimização de parâmetros aplicaram-se metodologias de Taguchi, elaborando um planeamento de experiências, possibilitando a análise de quatro fatores distintos a três níveis, nomeadamente a temperatura do *nozzle*, da cama quente, a velocidade de impressão e a altura de camada.

Apesar das dificuldades na impressão de PEEK, foi possível determinar a melhor combinação de parâmetros de impressão, obtendo-se provetes satisfatórios com resistência mecânica na ordem dos 56MPa em ambas.

Abstract

Polyetheretherketone (PEEK) is a thermoplastic polymer with one of the best mechanical characteristics, combined with high heat and chemical resistance. It is one of the most advanced materials for 3D printing using the FFF method allowing a wide range of applications in some engineering areas.

This dissertation aims to characterize the effect of 3D printing parameters on the mechanical properties of PEEK. For this purpose, PEEK specimens were produced using the FFF technique in two different printers in order to compare results. To print it, it was necessary to adapt a 3D printer developed at the Instituto Politécnico de Setúbal (IPS), introducing modifications such as the construction of a hot chamber, changing the printhead, extruder and hotend. Later a commercial printer was used for comparison of results.

For parameter optimization, Taguchi methodologies were applied, elaborating a Design of Experiments, which allows the analysis of four distinct factors at three levels, namely the nozzle temperature, the hot bed temperature, the print speed and the layer height.

Despite the difficulties in PEEK printing, it was possible to determine the best combination of printing parameters, obtaining satisfactory specimens with mechanical strength of 56MPa in both printers.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Índice de figuras.....	ix
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xiii
1. Introdução	1
1.1. Motivação:.....	1
1.2. Objetivos Principais:	2
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1. Uma revolução na indústria de produção.....	3
2.2. O que é “ <i>additive manufacturing</i> ”?	3
2.3. Processo FFF	4
2.4. Aplicações do processo de FFF	8
2.4.1. Prototipagem rápida.....	8
2.4.2. Pequenos volumes de produção	9
2.4.3. Engenharia Biomédica.....	9
2.4.4. Indústria automóvel e aeroespacial	10
2.5. Poli-éter-éter cetona (<i>Polyether ether ketone</i> , PEEK).....	11
3. Caracterização do problema	15
3.1. Impressão de PEEK.....	15
3.2. Impressora Delta IPS.....	16
3.3. Alterações efetuadas à Delta IPS	20
3.4. Principais parâmetros de impressão 3D.....	22
4. Projeto e alterações efetuadas.....	25
4.1. Projeto da Câmara Quente	25
4.2. Isolamento do volume de impressão.....	28
4.3. Aquecimento e controlo de temperatura	32
4.4. Circulação forçada de ar	37
4.5. Cabeça de impressão: <i>hotend</i> com arrefecimento por ar e extrusão <i>Bowden</i>	39
4.6. Cabeça de impressão: <i>hotend</i> e extrusor direto com arrefecimento por água.....	41
4.7. Cabo elétrico e hidráulico	47
4.8. Configuração do controlador e calibração da impressora	52

5.	Otimização de parâmetros de impressão	61
5.1.	Propriedades mecânicas.....	61
5.2.	Planeamento de Experiências	61
5.3.	Ensaio de Tração Uniaxial.....	66
6.	Resultados experimentais	71
6.1.	Realização dos ensaios e aquisição de dados.....	71
6.2.	Resultados obtidos com a Delta IPS	73
6.3.	Resultados obtidos com a Creatbot F430.....	79
6.4.	Apreciação crítica dos resultados	82
7.	Conclusão.....	85
7.1.	Proposta de trabalhos futuros	86
7.2.	Nota final.....	87
8.	Bibliografia	89
9.	Anexos	95
	Anexo 1 - Plano de Processo para cabeça de impressão com arrefecimento por ventilação forçada	95
	Anexo 2 - Plano de Processo para cabeça de impressão arrefecida a água	98
	Anexo 3 - Plano de Processo para suporte do termoventilador.....	101
	Anexo 4 - Esquemas elétricos	103
	Anexo 5 – Código G de configuração da Delta IPS	105
	Anexo 6 – Números de série de equipamentos de medição utilizados.....	107
	Anexo 7 – Desenhos técnicos.....	109

Índice de figuras

Figura 1 - Síntese do procedimento de impressão 3D	3
Figura 2 - As sete famílias da manufatura aditiva. Adaptado de[3]	4
Figura 3 - Deposição de material fundido sobre camadas solidificadas. Adaptado de [4]	4
Figura 4 - Hotend E3D V6 [5].....	5
<i>Figura 5 - Vista explodida do E3D Titan. Um alimentador de filamento para impressão 3D [7]</i> 6	
Figura 6 - Esquemática do processo de impressão 3D [6]	7
Figura 7 - Representação de várias estruturas e respetivos mecanismos cinemáticos. Impressoras cartesianas e delta (a), impressora core xy (b), impressora SCARA (c), e impressora de 5 eixos (d).....	8
Figura 8 - Modelo para canal de gitagem[12].....	9
Figura 9 - Peças utilizadas na construção de um banco para o airbus A350 XWB produzidas em Ultem 9085 numa impressora Fortus 900mc[21]	11
Figura 10 - Hierarquia de polímeros utilizados em impressão 3D[24]	13
Figura 11 - Effector e cabeça de impressão original.....	16
Figura 12 - Impressora Delta IPS no estado original	17
Figura 13 - Guia linear em alumínio, carro com regulação de folga e rótulas magnéticas.....	18
Figura 14 - Interface Touchscreen e Duet Wifi	20
Figura 15 - Impressora T850P da Tractus 3D, Funmat PRO410 da INTAMSYS e Fortus 900MC da Stratasys	21
Figura 16 - Esquema do sistema de refrigeração implementado na Delta IPS.....	22
Figura 17 - Representação esquemática de um corte de uma peça produzida por FFF. a) Camadas finas b) Camadas grossas	23
Figura 18 – Esquerda: Esforços aplicados paralelamente às camadas de impressão. Direita: Esforços aplicados perpendicularmente às camadas impressas	24
Figura 19 - Montagem de um painel quinado.....	28
Figura 20 – Topo: Dobradiça pivotante; Baixo: Montagem da dobradiça pivotante com painel quinado	29
Figura 21 - Montagem de uma porta plana e uma dobradiça pivotante	30
Figura 22 - Alçado frontal da impressora Delta IPS com a versão final das portas para a câmara quente.....	31
Figura 23 - a) pormenor da dobradiça; b) pormenor da montagem das dobradiças	31
Figura 24 - Esquema elétrico para controlo de circuitos de potência.....	35
Figura 25 - a) Instalação dos relés e ligações elétricas. b) Fotografia de infravermelhos para análise da dissipação de calor nos relés	36
Figura 26 - Suporte ventilador. a) Software CAM gera os percursos da ferramenta de corte. b) Instalação do termoventilador e das ventoinhas suplementares	37
Figura 27 - Instalação de um ventilador radial com suporte fabricado por impressão 3D	38

Figura 28 - Linha de código G para controlo do ventilador.....	38
Figura 29 - Cabeça de impressão original da Delta IPS	39
Figura 30 - Percursos da ferramenta de corte gerados por CAM e peça final maquinada.....	40
Figura 31 – Condutores elétricos para circuito de deteção da união entre rótulas magnéticas....	41
Figura 32 – a) E3D Aqua b) Dyzend Pro [34], [35]	42
Figura 33 - Percurso da ferramenta de corte gerado pelo CAM	44
Figura 34 – Suporte de fixação produzido por impressão 3D e suporte produzido por quinagem	45
Figura 35 - Moitão e contrapeso da cabeça de impressão arrefecida por água	46
Figura 36 - Montagem da cabeça de impressora	46
Figura 37 - Imagens infravermelhos de vários componentes da impressora. Em cima entrada e saída de água do radiador, em baixo análise da temperatura do extrusor e hotend.	47
Figura 38 – a) Passagem dos cabos elétrico e tubagens hidráulicas do exterior para o interior da câmara. b) receção do cabos e tubagens hidráulicas na cabeça de impressão	49
Figura 39 - Instalação da bomba, radiador e vaso expensor.	49
Figura 40 - Transformador 12V e circuito de comando.....	50
Figura 41 - Circuito elétrico para controlo do circuito de refrigeração.....	51
Figura 42 - Ligações de I/O do Duet Wifi para conetores na cabeça de impressão	51
Figura 43 - Diagrama de controlo de temperatura [37] e gráfico de resposta do hotend ao aquecimento. A vermelho: temperatura do hotend. A azul: temperatura da cama quente. A verde: temperatura da câmara.....	52
Figura 44 - Linha de código G para ciclo de calibração do controlador PID.....	53
Figura 45 - Linha de código G para apresentar o relatório do ciclo de calibração	53
Figura 46 - Relatório do ciclo de calibração apresentado em código G.....	53
Figura 47 - Linhas de código G para controlo dos ventiladores	54
Figura 48 - Figura 48 - Linhas de código G que definem a área e a posição do sensor de altura para a configuração arrefecida por água.....	55
Figura 49 - Linhas de código G que definem a área e a posição do sensor de altura para a configuração arrefecida por ar.....	55
Figura 50 - Diversos esquadros tridimensionais para calibração da impressora	56
Figura 51 - Linha de código G para calibração do fator de escala.....	57
Figura 52 - Parâmetros necessários para a calibração da perpendicularidade dos eixos da impressora.	57
Figura 53 - Linha de código G para correção da perpendicularidade entre eixos da impressora	58
Figura 54 - Projetor de perfis utilizado para verificação da perpendicularidade.....	58
Figura 55 - Dados a compilar após a execução do comando G32	59
Figura 56 - Zonas amorfas e semi-cristalinas num provete em PEEK.....	63
Figura 57 - Diferentes geometrias de provetes para pré-ensaios.....	67
Figura 58 -Proвете ISO527 1BA com comprimento de 95mm.....	67

Figura 59 - Provete impresso em PEEK	68
Figura 60 - Máquina utilizada para ensaio de tração e montagem de um provete	69
Figura 61 – Resultados de diferentes provetes ensaiados	72
Figura 62- Fatores de controlo sobre razão Sinal - Ruído	74
Figura 63 - Fatores de controlo, análise das respostas médias	75
Figura 64 - Fatores de controlo sobre razão Sinal - Ruído para resultados não considerando outliers	77
Figura 65 - Fatores de controlo sobre razão Sinal – Ruído.....	78
Figura 66 - Fatores de controlo sobre razão Sinal – Ruído para provetes da Creatbot.....	82
Figura 67 - Número de série do projetor de perfis	107
Figura 68 - Número de série da câmara de infravermelhos	107
Figura 69 - Número de série da máquina de ensaio de tração uniaxial	107
Figura 70 - Número de série do paquímetro utilizado na medição dos provetes.....	108

Lista de Abreviaturas e Símbolos

ABS	Estireno Acrilonitrilo Butadieno
BIOS	<i>Basic Input/Output System</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
CAM	<i>Computer added manufacturing</i>
CNC	Comando numérico computadorizado
DoE	<i>Design of Experiences</i>
FFF	<i>Fused Filamnet Fabrication</i>
IPS	Instituto Politécnico de Setúbal
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PEI	Polieterimida
PET	Polietileno tereftalato
PET-G	Polietileno Teraflato Glicol
PID	Controlo proporcional, integral, derivativo
PLA	Ácido Poliláctico
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
S/N	<i>Signal to noise ratio</i>
TAC	Tomografia Axial Computarizada

1. Introdução

1.1. Motivação:

Foi nos anos oitenta que surgiu a primeira patente de uma impressora 3D. Com a generalização e distribuição em massa de impressoras 3D a preços competitivos que permitem à generalidade da população adquirir ou construir uma máquina, as impressoras 3D atingiram imenso público. Para engenheiros, projetistas, inventores e artistas abriu-se uma porta para o mundo da prototipagem rápida que não existia há trinta anos. Para os engenheiros em especial, a prototipagem rápida com recurso à impressão 3D é um método de fabrico apetecível, dado o custo relativamente baixo da criação de peças por este método.

Face às inúmeras vantagens deste método, houve uma evolução no sentido de permitir o fabrico de peças funcionais por este método. Com nova procura, o mercado evolui no sentido de oferecer máquinas e filamentos com propriedades que permitem a sua utilização no meio industrial. Para a criação de peças funcionais, os engenheiros necessitam, à semelhança dos outros métodos de fabrico, de caracterizar o comportamento mecânico das peças fabricadas por impressão 3D, pelo que este estudo visa contribuir nesse sentido.

Os primeiros materiais a estar disponíveis para impressão 3D foram o ácido poliláctico (PLA) e o estireno acrilonitrilo butadieno (ABS). Contudo, para fins de engenharia, estes materiais eram algo limitados nas suas propriedades mecânicas pelo que o mercado começou a oferecer filamentos com características mecânicas superiores, tais como o policarbonato, as poliamidas e o polietileno tereftalato (PET). Por fim, nos anos mais recentes e com o aprimorar dos processos de impressão, o mercado disponibilizou os polímeros considerados de alto desempenho - nomeadamente o PEEK e a polieterimida (PEI). Estes apresentam características mecânicas superiores aos anteriores, assim como propriedades adicionais relevantes para algumas áreas da engenharia como por exemplo, a resistência a químicos e a biocompatibilidade que tornam o PEEK um polímero de excelência para a indústria biomédica, ou a resistência ao fogo e a não produção de fumo aquando da combustão do PEI, sendo atualmente um dos únicos materiais poliméricos certificados para a aeronáutica.

Assim, o estudo das propriedades mecânicas dos materiais impressos é de relevante importância para a produção de peças funcionais. É com esta premissa que se pretende realizar este estudo, contribuindo para um maior conhecimento da influência

dos parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas dos materiais, concretamente no PEEK.

Contudo para a impressão de PEEK é necessário ter impressoras com características técnicas específicas o que geralmente só está disponível nas gamas mais altas. No Instituto Politécnico de Setúbal tem estado a ser desenvolvida uma impressora (DeltaIPS) para a impressão de PEEK, mas que no início do presente trabalho ainda só tinha capacidade para impressão de PLA e ABS. Foi necessário desenvolver alguns componentes novos e adequar outros que já estavam desenvolvidos no sentido de garantir que esta impressora cumpria os requisitos necessários.

1.2. Objetivos Principais:

Alteração da impressora DeltaIPS de forma a poder imprimir materiais estruturais como o PEEK:

- Conceção de uma estufa quente para a impressora DeltaIPS;
- Introdução de um extrusor e *hotend* arrefecidos a água;
- Fabrico de várias peças para o extrusor e sistema de aquecimento da estufa;
- Projeto dos vários sistemas de controlo dos diversos equipamentos instalados;
- Configuração e calibração da impressora DeltaIPS para o trabalho experimental a realizar;
- Verificação dimensional das peças obtidas por impressão 3D na impressora DeltaIPS.

Otimização de parâmetros de impressão para a impressão de PEEK na impressora DeltaIPS:

- Identificação dos parâmetros mais importantes;
- Aplicação de métodos de planeamento de experiências;
- Análise e conclusão de resultados experimentais.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Uma revolução na indústria de produção

Uma transformação no mundo da produção decorre neste momento. Uma transformação que promete um futuro mais sustentável e personalizado. Esta revolução assenta na evolução da manufatura aditiva, uma nova tecnologia de produção para complementar as atuais. Este novo processo não procura substituir os processos de fabrico tradicionais, mas procura complementar uma lacuna existente. Procurando fabricar peças de forma aditiva a partir de matéria bruta, este processo apresenta algumas vantagens ambientais e económicas quando comparado com métodos subtrativos. De momento, e dado ser um processo de fabrico com apenas 30 anos de existência, ainda existem muitos estudos a realizar de modo a que a sua total implementação na indústria da produção tenha sucesso[1].

2.2. O que é “*additive manufacturing*”?

O processo de manufatura aditiva - “*Additive manufacturing*” (AM)- é um processo que consiste na criação de peças funcionais tridimensionais através da deposição de camadas sobre camadas.

O processo para se obter uma peça por manufatura aditiva começa com a execução de um modelo tridimensional num software de *computer aided design* (CAD) (figura 1). De seguida este modelo deve passar por um segundo *software* de “*slicing*” que prepara todo o processo de impressão, começando por fazer o seccionamento do objeto por camadas com uma determinada resolução (altura de camada). Este *software*, permite também definir as temperaturas de impressão, velocidades, entre outros parâmetros gerando um código G que é interpretado pelas máquinas de manufatura aditiva que irão *a posteriori* imprimir a peça.



Figura 1 - Síntese do procedimento de impressão 3D

Na figura 2 estão representadas as sete famílias de manufatura aditiva, de acordo com a norma ASTM F2792 [2]. Adicionalmente, a última revisão da norma considera a tecnologia híbrida – manufatura aditiva combinada com manufatura subtrativa – também como uma família da manufatura aditiva.

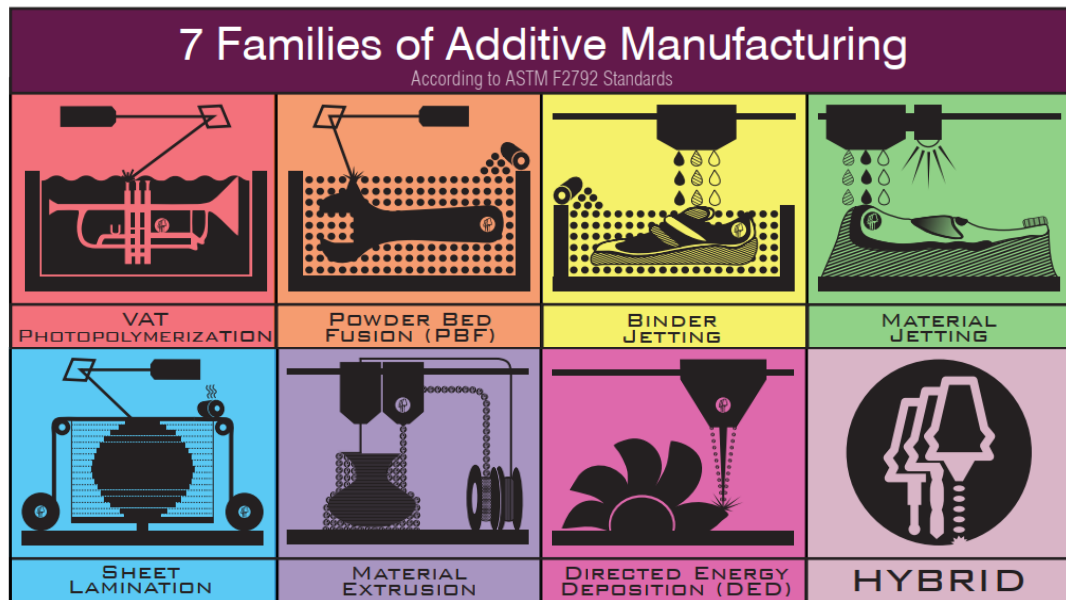


Figura 2 - As sete famílias da manufatura aditiva. Adaptado de[3]

Para este estudo utilizar-se-á a técnica de “Material Extrusion” também designada por “*Filament Fusion Fabrication*” - FFF. Esta técnica permite a fusão de termoplásticos e a sua deposição controlada para a criação de um objeto tridimensional[4].

2.3. Processo FFF

O processo de FFF, é caracterizado pela deposição de filamento fundido sobre filamento previamente solidificado, ao longo de várias camadas como demonstrado na Figura 3.

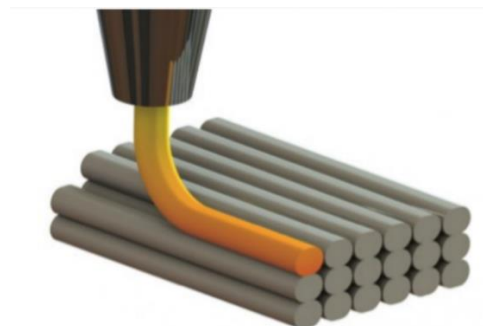


Figura 3 - Deposição de material fundido sobre camadas solidificadas. Adaptado de [4]

Esta tecnologia de manufatura aditiva consiste na utilização de um polímero em bruto sobre a forma de um filamento de secção constante obtido previamente por extrusão. Este filamento é empurrado por meio de um mecanismo de alimentação que controla, com elevada precisão, a quantidade de material com que alimenta uma extrusora a jusante. O filamento é então conduzido através de tubos flexíveis (sistemas *Bowden*) ou canais rígidos (*direct extrusion*) até à extrusora, como a apresentada na Figura 4.

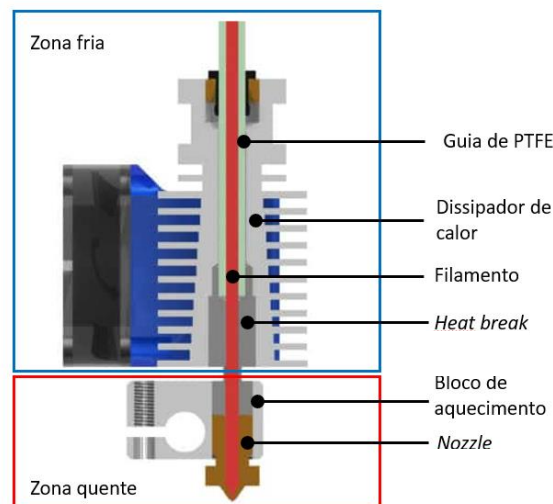


Figura 4 - Hotend E3D V6 [5]

Os *hotend*, designação do mecanismo de fusão de polímeros, utilizados em impressão 3D são tipicamente caracterizados por apresentarem uma zona quente e uma zona fria. A zona fria consiste num dissipador de calor e num mecanismo de alimentação de filamento. Tipicamente, um tubo de teflon (PTFE) conduz o filamento até um *heatbreak* - uma zona caracterizada por um elevado gradiente térmico e fabricada com recurso a metais com baixa condutividade térmica. Este conduz o filamento ainda frio até à zona quente. A zona quente é caracterizada tipicamente por um bloco de alumínio, onde são montados uma resistência elétrica e um sensor de temperatura (uma termorresistência ou um termopar, por exemplo), responsáveis pelo aquecimento e controlo de temperatura, respetivamente. É ainda montado um *nozzle* com um diâmetro bem controlado, podendo optar-se por diversos diâmetros na ordem dos 0,15mm até mais de 1,2mm, por onde é feita a extrusão do polímero. Ao invés do processo de extrusão tradicional onde existe um fuso que obriga o material a escoar por um orifício, na impressão 3D o filamento sólido que se encontra na zona fria da extrusora cria pressão sobre o filamento fundido que se encontra na zona quente, assim o procedimento pode decorrer em contínuo [1],[6].

Para alimentar a extrusora é utilizado um mecanismo de alimentação composto por um motor, um mecanismo redutor e um componente próprio para movimentar o filamento designado por *hobbed*. Esta peça, é na prática, um pequeno veio com um corte em forma de meia lua e um recartilhado para ajudar a criar atrito entre o filamento e o *hobbed*. Figura 5 está representada uma vista explodida de um mecanismo de alimentação utilizado na impressora Delta IPS[7], que inclui um redutor com um andar.

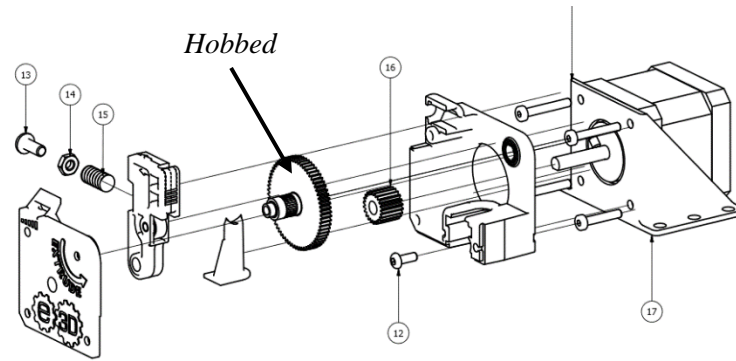


Figura 5 - Vista explodida do E3D Titan. Um alimentador de filamento para impressão 3D [7]

Embora sejam mecanismos simples, estes equipamentos são as peças mais importantes de uma impressora 3D, pois são responsáveis pelo controlo da fusão e da deposição de polímero – o que caracteriza todo o processo de FFF. A Figura 6 esquematiza o funcionamento dos mecanismos mencionados anteriormente.

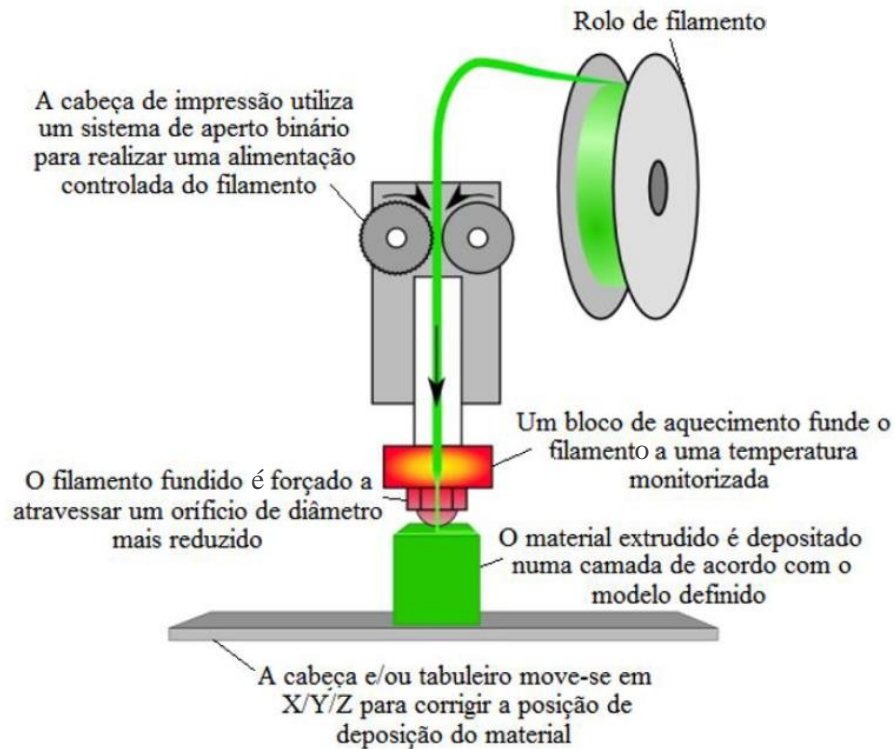


Figura 6 - Esquemática do processo de impressão 3D [6]

Quanto à estrutura e mecânica da máquina existem diversas configurações possíveis. Existem máquinas cartesianas, *corexy*, *corexz*, deltas, scaras, entre outros projetos mais complexos (como impressoras de cinco eixos)[1][8][9][10] [11]. Independentemente da estrutura e mecanismos utilizados, a sua função consiste na reprodução de movimentos, procurando ter uma precisão cinemática elevada, semelhante a uma máquina ferramenta com controlo numérico. Na figura 7 estão representados os vários estilos de impressoras 3D. As impressoras cartesianas caracterizam-se pela sua simplicidade e facilidade de compreensão dos mecanismos de movimento. Tipicamente, são impressoras mais económicas e que não permitem velocidades muito elevadas de impressão devido às elevadas massas que cada eixo tem de movimentar. Em contraste, as impressoras do tipo delta apresentam uma desvantagem económica e um mecanismo de transmissão de movimento mais complexo e difícil de compreender. As impressoras 3D de cinco eixos, representadas na figura 7, abrem portas a novas possibilidades como o *slicing* não planar, algo que ainda está em desenvolvimento.

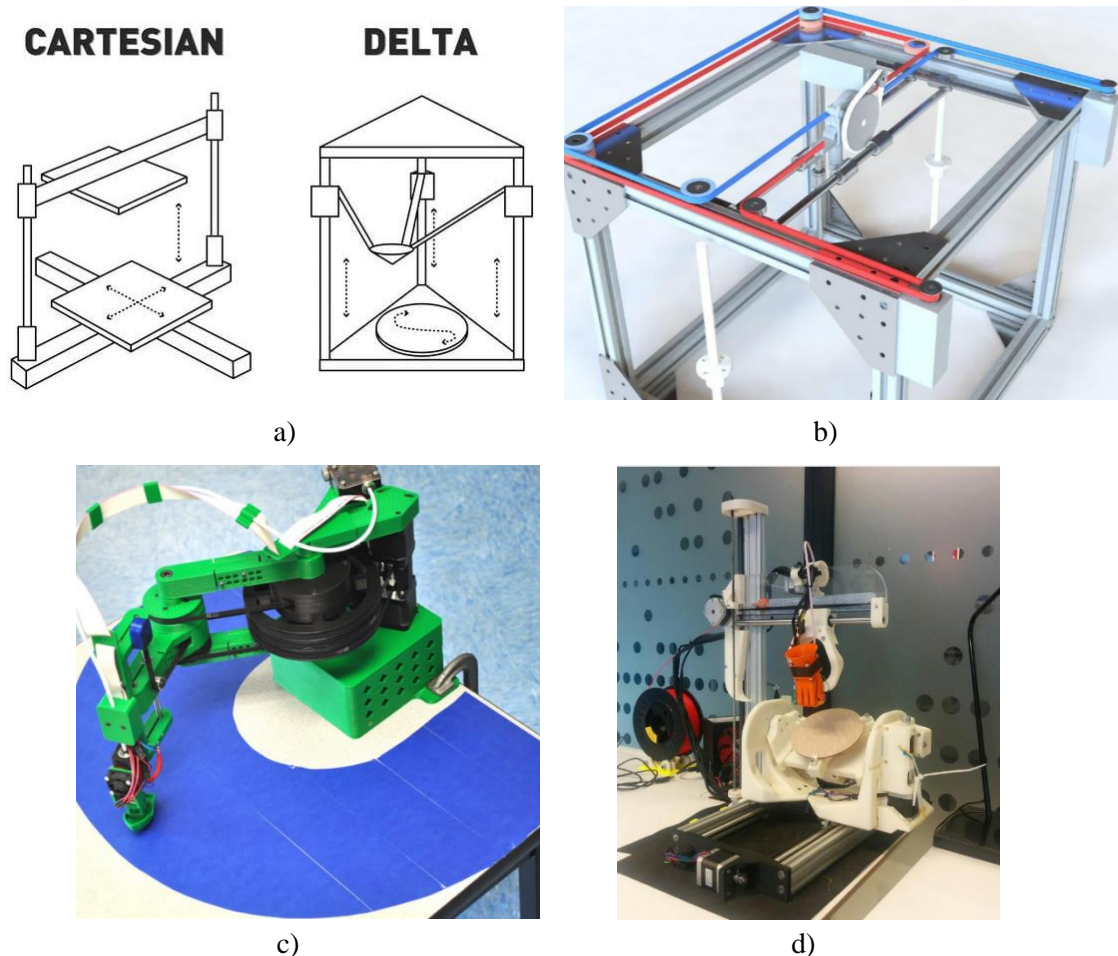


Figura 7 - Representação de várias estruturas e respetivos mecanismos cinemáticos. Impressoras cartesianas e delta (a), impressora core xy (b), impressora SCARA (c), e impressora de 5 eixos (d)

2.4. Aplicações do processo de FFF

2.4.1. Prototipagem rápida

O conceito de prototipagem rápida centra-se na capacidade de produzir peças funcionais, em escala reduzida ou real, através de um processo pouco demorado e com custos reduzidos. A tecnologia de FFF não pretende substituir os métodos clássicos de produção de protótipos, mas sim complementar a sua existência. Uma indústria que beneficia amplamente com esta tecnologia é a indústria dos moldes[12]. Com recurso à prototipagem rápida é possível produzir modelos rapidamente, a custos muito reduzidos e que, com tratamentos adequados, podem substituir um modelo tradicional. Este processo é particularmente vantajoso para modelos complexos, pois requer menos tempo de manufatura e menor mão de obra. Assim, pode ser possível produzir peças preliminares para avaliação do molde e do processo de fundição ou injeção. Como frequentemente os primeiros desenhos precisam de sofrer ligeiras alterações a impressão

3D permite criar diversos modelos, rapidamente e mais economicamente do que os processos tradicionais como o corte por arranque de aparas, ou carpintaria[1][8][13]. A Figura 8 ilustra um modelo para um canal de gitagem onde se pretende dividir o canal de vazamento em vários canais de ataque.

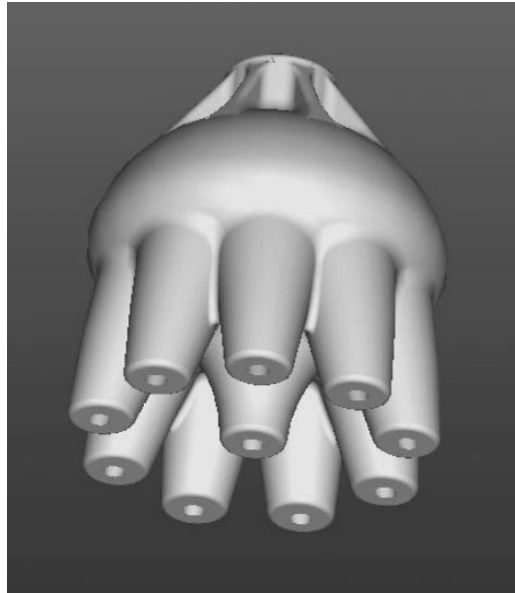


Figura 8 - Modelo para canal de gitagem[12]

2.4.2. Pequenos volumes de produção

Para produção de pequenas quantidades de determinadas peças, as tecnologias FFF podem ser mais vantajosas do que métodos tradicionais. Os baixos custos de *set up*, aliados à rápida velocidade de produção e ao reduzido número de operadores necessários, são vantagens determinantes para o sucesso destes métodos. Para pequenos protótipos, peças sujeitas a baixos esforços ou como modelos e maquetes para apresentações, este método é o mais indicado, pois é possível fabricar peças com muito pouco material, (inclusive peças totalmente ocas) o que reduz ainda mais o custo[14].

2.4.3. Engenharia Biomédica

Vários ramos da ciência andam comumente ligados entre si. A engenharia biomédica não é exceção e tem um compromisso inegável com a engenharia mecânica. As técnicas FFF podem também ser aplicadas, na engenharia biomédica na criação de implantes e próteses adaptados exclusivamente aos pacientes, no auxílio de sistemas de libertação controlada de medicamentos ou em planeamento cirúrgico[16]. Na medicina é possível criar imagens tridimensionais através das técnicas de TAC, sendo que estas imagens podem ser convertidas em ficheiros CAD. Deste modo, é possível imprimir reproduções

do interior de um paciente para que a equipa médica possa avaliar a melhor maneira de realizar uma intervenção no paciente[1],[8],[13],[17][18]. Recentemente, uma equipa de investigadores chineses conseguiram aplicar com sucesso um implante personalizado, produzido por impressão 3D, utilizando o PEEK como material para a prótese [19].

2.4.4. Indústria automóvel e aeroespacial

A NASA considera o fabrico aditivo por tecnologias FFF um fator impulsionador em futuras missões espaciais, empregando estas tecnologias em grande escala para a produção de habitações para colónias espaciais, na reconstrução e reparação de equipamentos danificados nas colónias ou em órbita espacial[1][8].

Recentemente, a *Ultimaker* - uma produtora de renome de impressoras 3D - tem utilizado a sua parceria com a *Ford* para fins publicitários. A última usou impressoras 3D para produzir ferramentas muito específicas para a reparação de cada modelo de carro que cada oficina pode imprimir somente quando necessitar, sendo que a frequência com que se realiza estas intervenções é tão baixa que não se justifica o fabrico e distribuição em escala das ferramentas[20].

As tecnologias FFF permitem também a criação de peças de substituição para carros clássicos. A escassez de peças de substituição ou a reparação de peças em serviço representa uma dificuldade na indústria dos automóveis clássicos, lacuna essa que pode ser preenchida utilizando técnicas FFF. No entanto, a utilização destas técnicas para produção de peças ou reparação de peças existentes em automóveis novos não é aceite pelas legislações em vigor devido à imprevisibilidade do comportamento mecânico de peças produzidas por FFF, devido ao reduzido conhecimento atual sobre a matéria[8].

Para a indústria aeronáutica existem também soluções certificadas para a produção de componentes como a impressora *Stratasys Fortus 900mc* e os diferentes polímeros com certificação aeronáutica, nomeadamente os PEI, sobre a designação comercial de Ultem 1010 e Ultem 9085, assim como algumas poliamidas (comercialmente designadas de Nylons) certificadas. Com estas impressoras é possível construir peças de reposição, peças para atualização de frotas bem como uma variedade de ferramentas e gabaritos respeitando os apertados regulamentos aeronáuticos. Na Figura 9, podemos observar algumas peças de um banco de passageiros utilizado no airbus A350 XWB[21].



Figura 9 - Peças utilizadas na construção de um banco para o airbus A350 XWB produzidas em Ultem 9085 numa impressora Fortus 900mc[21]

2.5. Poli-éter-éter cetona (*Polyether ether ketone*, PEEK)

O poli-éter-éter-cetona (PEEK) é um termoplástico semi-cristalino de excelentes propriedades físicas usado nas mais exigentes aplicações de engenharia. Caracterizado pela sua elevada resistência mecânica (tabela 1) e resistência química, mantendo-as mesmo a elevadas temperaturas, torna-o um dos mais nobres materiais poliméricos. Como tal, é utilizado na indústria automóvel, aeroespacial, na condução de fluídos a altas temperaturas, na indústria alimentar, entre outras. A sua resistência a ambientes biológicos e aquosos, assim como a sua biocompatibilidade, é notável e ,por isso é utilizado frequentemente em aplicações biomédicas como implantes e próteses[22].

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da família PAEK

Propriedade (ISO 527)	PEEK*	PEK	PEKEKK	PEKK*
Módulo de elasticidade (GPa)	3.5	3.7	4.3	4.4
Tensão de cedência (MPa)	105	115	115	110
Elasticidade (%)	30	30	20	12
*comercialmente disponíveis para impressão 3D				

A primeira sintetização deste composto ocorreu durante os anos 80 pela empresa VICTREX™. No entanto, as suas origens remontam os anos 60 quando a empresa estudava e sintetizou com sucesso as primeiras moléculas de Poliariletercetonas (PAEK), a família mãe do PEEK. Nos 15 anos subsequentes, foram ainda descobertos a família poli-éter-cetona (PEK) e seus derivados, até que aprimoraram a primeira fórmula comercial de PEEK. Adicionalmente foram ainda descobertas mais algumas variantes destes compostos como o Poli-éter-cetona-cetona (PEKK) e o Poli-éter-cetona-éter-cetona-cetona. (PEKEKK)[23],[22].

Foi apenas durante os anos 2000 que os PAEK ganharam maior quota de mercado com a expansão da indústria petrolífera *offshore* e a necessidade de utilizar polímeros com temperaturas vítreas altas. Na extração petrolífera costeira é necessário a utilização de materiais com características mecânicas e químicas de alto rendimento em situações de altas pressões (150 MPa) e a altas temperaturas (200°C), sendo que a massa dos materiais utilizados deve ser mínima, pois as plataformas de extração são na prática estruturas flutuantes. Estas necessidades conduzem à utilização de materiais poliméricos, na sua generalidade mais leves que os alumínio e aços[22]. Após demonstrada a sua eficácia como material polimérico de alto desempenho, cada vez mais indústrias recorreram à utilização do PEEK, tornando-o um material mais disponível e, devido à maior procura, também um material mais económico.

Em termos comparativos, o PEEK situa-se no topo da pirâmide dos polímeros para a impressão 3D. A Figura 10 propõe hierarquizar os polímeros de impressão 3D de acordo com o seu desempenho, sendo que, paralelamente, o ponto de fusão tem um aumento proporcional e o custo tem um comportamento exponencial. A pirâmide cinge-se aos polímeros no seu estado nativo, sendo que muitas vezes estes podem ser misturados com partículas ou outros aditivos com o objetivo de melhorar determinadas propriedades, por exemplo, PLA condutor ou ABS anti estático. Estes produtos procuram colmatar nichos de mercado e o seu preço não pode ser comparado de igual maneira, uma vez que as baixas produções e as dificuldades inerentes à produção de algumas misturas aumentam o preço consideravelmente.

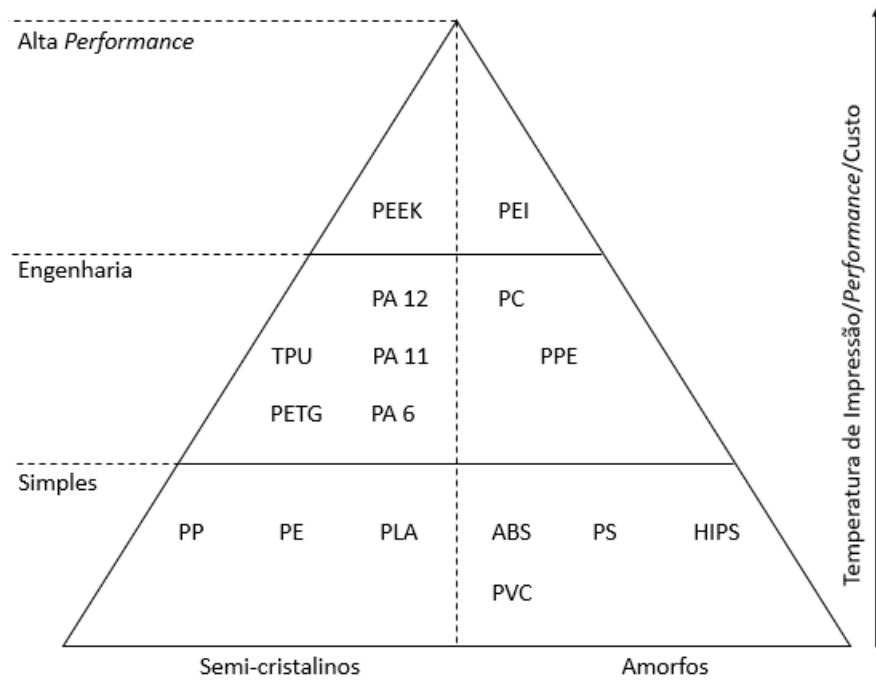


Figura 10 - Hierarquia de polímeros utilizados em impressão 3D[24]

3. Caracterização do problema

3.1. Impressão de PEEK

A impressão de PEEK pela tecnologia de FFF constitui uma barreira tecnológica para a maioria das impressoras disponíveis no mercado. Devido ao seu elevado ponto de fusão (343°C) e à necessidade de controlo do ambiente de impressão, apenas impressoras muito especializadas conseguem cumprir estes requisitos. Para que se consiga imprimir com sucesso PEEK, os fabricantes de filamento recomendam uma gama de temperaturas compreendida entre 360°C a 410°C Celcius e uma cama quente (onde é depositada a primeira camada), com uma temperatura entre 120°C a 200°C (a temperatura de transição vítrea situa-se a 143°C) – o que facilita a adesão do material à superfície de impressão. Na tabela 2 apresenta-se um resumo das temperaturas de impressão do PEEK de quatro fornecedores distintos [25][26][27][28]. Adicionalmente devido ao enorme gradiente térmico entre o polímero depositado e a temperatura ambiente em seu redor, a impressão de termoplásticos de altas temperaturas necessita da criação de um ambiente controlado que permita a redução deste gradiente térmico. Tal necessidade conduz à utilização de câmaras quentes (*heated chambers*) que funcionam como estufas para controlar a temperatura de ambiente de impressão e reduzir o gradiente térmico entre o polímero depositado e a atmosfera envolvente. Como estes requisitos não são cumpridos pela maioria das impressoras comerciais, é necessário construir impressoras personalizadas para estas tarefas.

Tabela 2 - Temperaturas de impressão do Filamento PEEK [25] [26][27][28]

Fornecedores/ Temperatura recomendada	ThermaX™	3D4Makers	RepRapPt	Innovatefil
Temperatura de extrusão (°C)	375-410	360-400	375-410	360-400
Temperatura para a cama quente (°C)	130-200	120-200	130-200	N.D.
Temperatura de atmosfera (°C)	70-150	N.D.	70-140	≥120

3.2. Impressora Delta IPS

A impressora DeltaIPS é uma impressora de geometria Delta, caracterizada pela utilização de três postes verticais como guias de movimento. Estas guias conduzem carros que, por meio de varetas articuladas, conduzem uma plataforma designada por *effector*. A relação entre os movimentos dos diferentes carros traduz-se num movimento coordenado ao longo do volume de impressão. O *effector* (Figura 11) é responsável pela fixação do *hotend*, assim como todos os acessórios necessários à impressão – tais como ventoinhas, sensores de temperatura e de posição, entre outros. Esta plataforma deve ser o mais leve possível pois as impressoras Delta são capazes de atingir grandes velocidades, pelo que menores massas reduzem as inércias, o que se traduz na possibilidade de movimentos mais rápidos, com maiores acelerações e regra geral maior precisão cinemática.

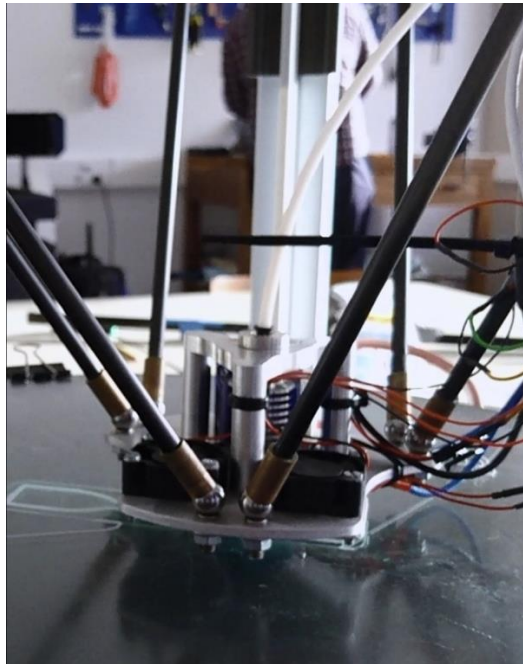


Figura 11 - Effector e cabeça de impressão original

A impressora DeltaIPS (Figura 12) foi projetada com o objetivo de imprimir polímeros de alto desempenho e como tal foi concebida para atingir temperaturas de extrusão de 500°C e contempla uma cama quente com capacidade para atingir 200°C. Na tabela 3, estão disponíveis algumas características principais da Delta IPS. O sistema de guias lineares em alumínio garante que a expansão das torres é igual à expansão da guia. O carro instalado nesta guia, utiliza chumaceiras poliméricas o que reduz a necessidade de lubrificação possibilitando a regulação da folga entre o carro e a guia eliminando uma das principais causas de perda de precisão em mecanismos com recurso a rolamentos (Figura 13). A ligação do *effector* às guias lineares é realizada por varetas equipadas com um sistema de rótulas magnéticas que garantem a eliminação da folga presente numa rótula convencional. Estas duas características permitem a redução das folgas mecânicas e por conseguinte possibilitam um aumento considerável da precisão.



Figura 12 - Impressora Delta IPS no estado original

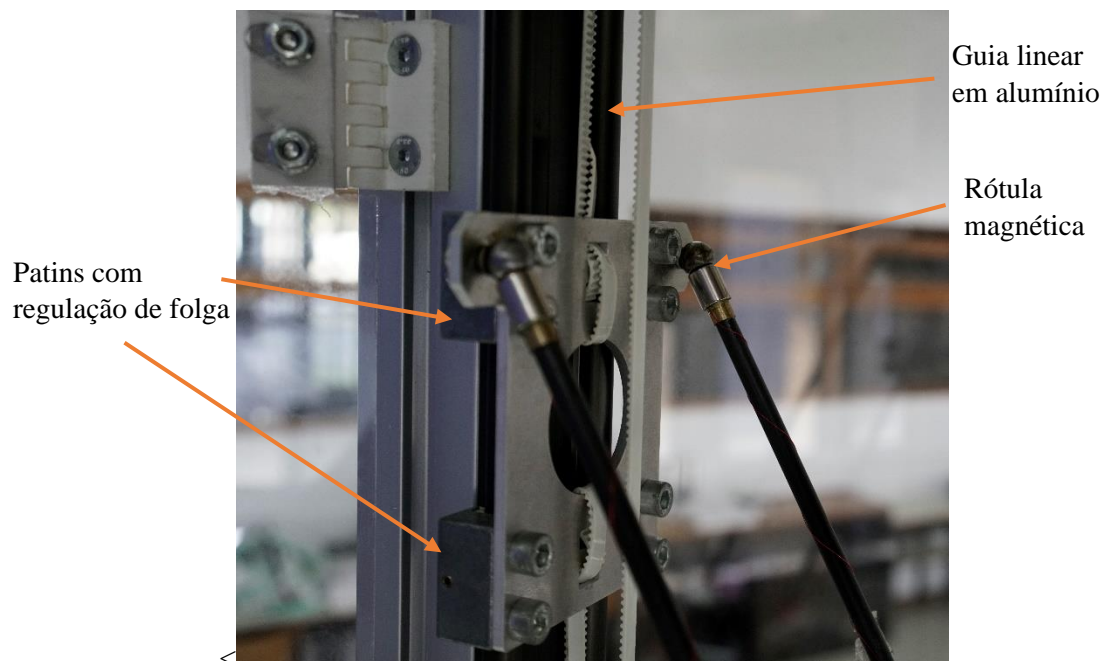


Figura 13 - Guia linear em alumínio, carro com regulação de folga e rótulas magnéticas

Tabela 3: Principais características da Delta IPS

Área de impressão	Diam. 400mm x 930mm	Temperatura máxima de câmara quente (prevista)	80°C
Temperatura máxima de extrusão	280°C	Filamento utilizado	1.75 mm
Temperatura máxima de cama quente	180°C	Velocidade máxima útil de impressão (PLA)	120 mm/s

No entanto, o seu estado atual não permite a impressão de PEEK. Foi proposto, para a realização deste estudo, o projeto de uma câmara quente que permite a estabilidade térmica do ambiente de impressão e, por conseguinte, a redução do gradiente térmico entre o polímero extrudido e o ambiente em seu redor. É ainda necessário proceder a alterações no mecanismo de extrusão, convertendo-o para um sistema com arrefecimento por água para impressão de polímeros mais exigentes termicamente (como o PEEK e o PEI), sendo que esta solução deve ser facilmente intercambiada com o mecanismo de extrusão com dissipação de calor por ventilação forçada, originalmente

instalado. Este último apresenta a vantagem de possuir menos componentes menos volumosos e ser uma estrutura mais leve. Estas características tornam-no de utilização preferencial aquando da impressão de polímeros mais convencionais (tais como PLA, ABS, PET-G).

Adicionalmente, é necessário garantir que todos os componentes da impressora que se encontrem dentro da câmara quente possam estar em exposição prolongada a temperaturas que rondem os 80°C, a temperatura máxima de serviço prevista para a atmosfera de impressão.

Eletronicamente, a DeltaIPS encontra-se equipada com um DuetWIFI; um controlador para impressoras 3D de arquitetura de 32 bit; com comunicação por WIFI, o que possibilita a interação através de um browser de internet que disponibiliza a interface gráfica, facilitando o controlo e a comunicação entre o operador e a máquina ou através de um ecrã de 5 polegadas com *touchscreen*, que facilita a alteração de parâmetros diretamente na impressora (figura13). A arquitetura de 32 bit aliada a uma rápida velocidade de processamento, quando comparada com a maioria das soluções alternativas, possibilita um vasto número de inputs/outputs, operações lógicas por unidade de tempo, conversores analógicos digitais de alta resolução bem como a possibilidade de vários controlos por *Pulse Width Modulation* (PWM) e movimento controlado de até dez eixos independentes. Adicionalmente, este controlador vem equipado com drivers de motor de passo de alta amperagem (até 2.4A quando arrefecido devidamente) e altos valores de *microstepping*, real ou interpolado, de até 256 vezes um valor de passo (o *microstepping* interpolado permite aliviar algum poder de computação utilizando valores de *microstepping* real mais baixos ficando a cargo do driver fazer a interpolação dos valores de *microstepping* mais elevados), o que permite o funcionamento dos motores de passo com pouco ruído. Este controlador é altamente configurável às necessidades dos clientes e permite uma rápida edição de qualquer configuração. Todas as configurações são efetuadas através de código G, compiladas num ficheiro de texto gravado em memória não volátil no controlador. Este ficheiro é iniciado em paralelo com a BIOS do controlador para configurar a máquina sempre que esta é ligada. Caso o utilizador pretenda, estas definições podem ser alteradas a meio da impressão, por exemplo, caso se deseje reduzir os valores de aceleração máxima para a execução de uma peça mais complicada. Para tal o utilizador apenas necessita de introduzir uma linha de código G com essa informação no início do ficheiro de impressão. Este controlador fornece também a capacidade do mapeamento da superfície de impressão com um total de até 64 pontos, garantido permanentemente a distância

especificada do *hotend* à superfície de impressão, aumentando substancialmente a probabilidade de uma correta impressão da primeira camada, o que proporciona uma melhor adesão desta à superfície de impressão.



Figura 14 - Interface Touchscreen e Duet Wifi

3.3. Alterações efetuadas à Delta IPS

Para realizar com sucesso impressões em PEEK, é necessário adaptar a Delta IPS de modo a ser possível controlar a temperatura ambiente de impressão. Para tal, é necessário desenhar uma câmara quente que se adapte à estrutura existente[29]. Esta câmara deve conter o calor no interior, proporcionar o controlo da temperatura, realizar convecção forçada de ar e extração de ar para o exterior para um arrefecimento rápido em caso de emergência. Após a análise dos diversos componentes da máquina e das respetivas fichas técnicas, verificou-se que a temperatura máxima admissível para a estufa seria 90°C. Como medida de segurança para compensar alguma sobrelevação durante o aquecimento ou uma situação de emergência, a temperatura de projeto estabeleceu-se como 80°C.

A impressora T850P da Tratus3D (figura 14), uma impressora comercialmente disponível, apresenta umas especificações muito semelhantes às da Delta IPS e dispõem de uma câmara quente semelhante à que se pretende fabricar para a Delta IPS. O seu preço de venda é de 15.000\$, o que se traduz em aproximadamente 13.500€. No entanto este é apenas um modelo de entrada. Um modelo de gama média como uma impressora *INTAMSYS Fummat Pro 410* é vendida por 35000\$ (aprox. 31000€) e uma impressora *Stratasys Fortus 900MC* certificada para a aeronáutica pode ascender a 750.000\$ (aprox. 676.000€) (Figura 15).



Figura 15 - Impressora T850P da Tractus 3D, Funmat PRO410 da INTAMSYS e Fortus 900MC da Stratasys

[30]

Um *hotend* arrefecido a água deve ser montado na impressora, uma vez que a temperatura de projeto para o ambiente de impressão é de 80°C e que a dissipação de calor dos *hotend* convencionais é realizada pela passagem de ar nas alhetas de um dissipador. Deste modo prevê-se que não se obtenha bons resultados de impressão podendo, inclusive, ocorrer entupimentos devido à fusão prematura de polímero no canal de alimentação antes do mesmo chegar à zona quente, a zona onde deve ocorrer a fusão. A implementação de um *hotend* arrefecido a água, assim como as suas necessidades elétricas e hidráulicas, são diferentes das necessidades de um *hotend* convencional. Porém, o IPS pretende compatibilidade total, pelo que se projetou cabeças de impressão modulares e a cablagem elétrica será intercambiável para que se façam as alimentações elétricas necessárias. Os tubos hidráulicos, para o fluído de arrefecimento, serão facilmente retirados, com possibilidade de manter o circuito estanque, desimpedindo volume de impressão e tornando a cabeça de impressão arrefecida a ar mais leve. O fornecimento de fluído de refrigeração será assegurado por uma bomba que deslocará fluído frio até ao *hotend*. Uma vez efetuada a permutação de calor, o fluído seguirá até a um radiador com fluxo de ar forçado onde se realizará a troca de calor com o exterior. Por fim, o fluido regressa a um vaso expensor de onde seguirá novamente até à bomba. A figura 15 pretende ilustrar o sistema de refrigeração.

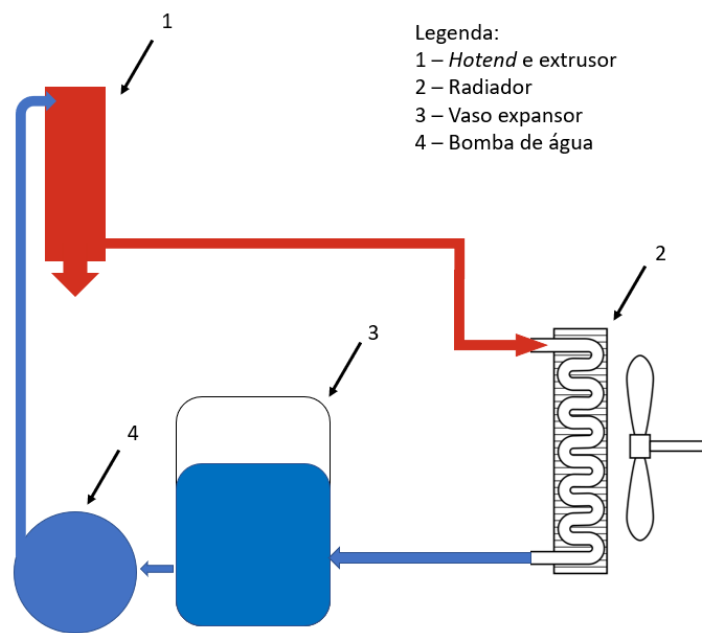


Figura 16 - Esquema do sistema de refrigeração implementado na Delta IPS

Por último, será necessário utilizar uma base de impressão revestida com uma camada de PEI, um polímero de alto desempenho com características semelhantes ao PEEK. A utilização de PEI como base de impressão é vantajosa pois a adesão entre polímeros é superior à adesão entre polímeros e vidro, lacas sobre vidro, cola sobre vidro, entre outras. É uma ferramenta regularmente utilizada na indústria e está disponível em várias medidas, previamente colada a uma fita cola de dupla face industrial para utilização a altas temperaturas, tornando fácil a sua colocação, por exemplo, sobre uma superfície de vidro.

3.4. Principais parâmetros de impressão 3D

Entre muitos parâmetros de impressão 3D, os mais relevantes e que tem maior influência no resultado final da impressão, são a temperatura de extrusão, a altura de camada, a velocidade de impressão e a orientação da peça no espaço de impressão.

A temperatura de impressão deve ser ligeiramente acima do ponto de fusão pois diminui a viscosidade do fluido e reduz a pressão de extrusão. Os fabricantes de filamento fornecem uma gama de temperaturas que deve ser respeitada. Temperaturas mais baixas que as indicadas não permitem viscosidade suficiente e podem conduzir a

difficultades de impressão. Por oposto, temperaturas muito elevadas levam à degradação do polímero e facilitam a ocorrência de entupimentos na extrusora. Segundo estudos prévios, temperaturas mais altas conduzem a uma maior ligação entre camadas, promovendo o aumento da resistência mecânica uma vez que o material depositado revela uma consistência mais homogênea[1][31][32].

A altura de camada especifica a dimensão que cada camada impressa deve ter. É possível obter com sucesso camadas compreendidas entre 0.05 milímetros e 1.2 milímetros. Embora não existam limites para estas camadas, os fabricantes de impressoras recomendam que a altura de camada não ultrapasse 80% do diâmetro do *nozzle* de extrusão. A sua relação com a resistência mecânica não é linear. Camadas mais finas têm menor área de resistência a esforços de tração e menor área de ligação com outras camadas e perímetros. No entanto, camadas muito grossas, embora tenham maior área de resistência, possuem maior área oca entre elas enquanto que as zonas de contacto entre camadas mantêm as mesmas dimensões. A Figura 17 pretende representar estas situações extremas. Assim, prevê-se que um compromisso entre os dois extremos seja o valor que maximiza a resistência mecânica[31][32].

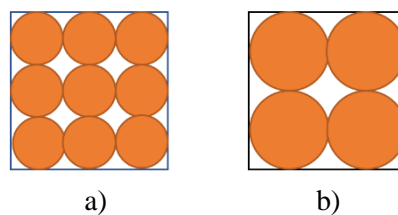


Figura 17 - Representação esquemática de um corte de uma peça produzida por FFF. a) Camadas finas b) Camadas grossas

A velocidade de impressão caracteriza a velocidade máxima a que os percursos a realizar podem ser executados. Esta velocidade não caracteriza a velocidade instantânea pois a mudança do vetor velocidade não é instantânea na realidade. No entanto, incrementos nestes parâmetros indicam que a deposição do material, regra geral, será feita mais rapidamente. O aumento da velocidade a que a impressora produz uma peça inevitavelmente conduz a um aumento da velocidade de extrusão, o que reduz o tempo disponível para a transferência de calor do bloco de aquecimento para o polímero. Devido a este fenómeno, é recorrente corrigir a temperatura de extrusão para valores ligeiramente superiores (5 a 10°C) para que a condução de calor tenha tempo de ocorrer e o polímero atinja a temperatura que inicialmente se pretendia. Maiores velocidades traduzem-se em maiores imperfeições no fabrico de peças, pelo que se antevê uma redução da resistência mecânica com o aumento da velocidade de impressão[31], [32].

A orientação das peças no espaço de impressão também é um fator determinante na sua resistência a esforços. Se os esforços forem aplicados na direção da deposição das camadas (Figura 18 à esquerda), prevê-se menor resistência pois a peça terá tendência a delaminar pela interface entre camadas. No entanto, se o esforço for efetuado no sentido perpendicular à deposição de camadas (Figura 18 à direita), prevê-se que o material tenha uma resistência muito superior pois os filamentos de polímero depositado resistirão a esforços de tração.

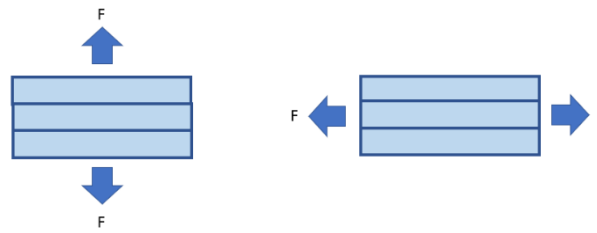


Figura 18 – Esquerda: Esforços aplicados paralelamente às camadas de impressão. Direita: Esforços aplicados perpendicularmente às camadas impressas

4. Projeto e alterações efetuadas

4.1. Projeto da Câmara Quente

Como referido anteriormente, a utilização de uma câmara quente reduz o diferencial de temperatura entre o polímero extrudido e o ambiente circundante. A principal vantagem que o controlo da temperatura ambiente possibilita é a redução das contrações térmicas do material. Esta particularidade leva, regra geral, a melhores resistências mecânicas, a melhores acabamentos de superfície e a peças com um maior rigor dimensional e geométrico. Contudo, nem todos os polímeros utilizados em impressão 3D beneficiam, ou apenas se verifica uma beneficiação marginal aquando da utilização da câmara quente. Exemplo concreto, o PLA, devido ao seu baixo ponto de transição vítrea (cerca de 60°C), requer muitas vezes arrefecimento imediatamente após a extrusão, para que este se torne rígido rapidamente. No entanto, para os polímeros de alto desempenho como PEEK e o PEI, o aquecimento da atmosfera é mandatório. Assim, os polímeros não sofrem alteração de fase e continuam semi-cristalinos. A impressão de peças em estado amorfo não apresenta vantagens pois as propriedades mecânicas do material são mais reduzidas, pelo que deve evitar-se a formação de zonas amorfas.

O Instituto Politécnico de Setúbal (IPS), colocou alguns requisitos funcionais que considerou imprescindíveis. Nomeadamente:

- Visualização do interior da câmara em todo o redor da máquina;
- Controlo de temperatura do interior para qualquer valor entre o intervalo de projeto;
- Acesso ao interior por qualquer frente da máquina;
- Fácil instalação

Ainda, para manter os custos o mais reduzidos possíveis, o IPS disponibilizou as suas oficinas e as ferramentas necessárias à execução deste projeto, assim como a colaboração técnica e multi-departamental para eventuais necessidades.

Estabelecidas as necessidades e os requisitos funcionais primários decidiu-se utilizar a filosofia de projeto axiomático neste trabalho. Numa primeira fase estabelece-se os requisitos funcionais principais para o projeto. Como se pode ver na tabela 4, estão especificados os dois primeiros níveis de requisitos de projeto (FR) e parâmetros de projeto (DP). Numa segunda fase, aprofunda-se cada FR e DP até ao nível 3 (tabela 5). Poderá aprofundar-se ainda mais procurando solucionar mais FR, contudo, o objetivo principal deste trabalho não se prende com a especificação exaustiva que o projeto

axiomático permite, sendo que pretende-se utilizar esta filosofia apenas para obter uma visão das principais necessidades e eventuais dificuldades técnicas inerentes ao projeto.

Tabela 4 - Requisitos funcionais e parâmetros de projeto de nível 1 e 2

	Requisitos Funcionais		Parâmetros de projeto	
Nível 1	FR ₁₁	Controlo da temperatura do ambiente de impressão	DP ₁₁	Estufa aquecida com ventilação forçada
Nível 2	FR ₂₁	Isolamento do espaço de impressão	DP ₂₁	Painéis para revestir a impressora
	FR ₂₂	Aquecer e controlar temperatura	DP ₂₂	Aquecedor elétrico com controlador PID
	FR ₂₃	Forçar a circulação de ar	DP ₂₃	Ventoinhas elétricas

Tabela 5 - Requisitos funcionais e parâmetros de projeto de nível 2 e 3

	Requisitos Funcionais		Parâmetros de projeto	
Nível 2	FR ₂₁	Isolamento do espaço de impressão	DP ₂₁	Painéis para revestir a impressora
Nível 3	FR ₃₁	Visualização do interior da câmara em todo o redor da máquina	DP ₃₁	Utilização de painéis de material transparente como vidro, acrílico ou policarbonato
	FR ₃₂	Acesso ao interior por qualquer frente da máquina	DP ₃₂	Utilização de um sistema de porta com dobradiça
	FR ₃₃	Fácil instalação	DP ₃₃	Estrutura aparafusada aos perfis de alumínio tipo BOSH
Nível 2	FR ₂₂	Aquecer e controlar temperatura	DP ₂₂	Aquecedor elétrico com controlador PID
Nível 3	FR ₃₄	Aquecer atmosfera	DP ₃₄	Aquecedor elétrico
	FR ₃₅	Controlo de temperatura do interior para qualquer valor entre o intervalo de projeto	DP ₃₅	Controlador PID
	FR ₃₆	Fácil instalação	DP ₃₆	Estrutura aparafusada ao topo da impressora em furação pré-existente
Nível 2	FR ₂₃	Forçar a circulação de ar	DP ₂₃	Ventoinhas radiais de alto caudal
Nível 3	FR ₃₇	Agitar o ar interior	DP ₃₇	Ventoinhas radiais de alto caudal
	FR ₃₈	Fácil instalação	DP ₃₈	Montagem com recurso a ligações aparafusadas e peças impressas

4.2. Isolamento do volume de impressão

Com vista à resolução do requisito funcional FR2.1 e aos sucessivos FR, foram projetados painéis laterais que funcionam como portas, assim como as respectivas dobradiças. Vários materiais foram equacionados sendo que o vidro, o acrílico e o policarbonato seriam as escolhas principais, pois são materiais transparentes, permitindo ver o interior da câmara, satisfazendo assim o requisito funcional. Sendo o coeficiente de condutividade térmica aproximadamente o mesmo do ponto de vista termodinâmico, não existe uma escolha preferencial dado que as diferenças de transferência de calor do interior para o exterior, uma perda inevitável, são negligenciáveis. Assim, a seleção do material foi condicionada pela temperatura de serviço. Sendo que o acrílico apenas pode operar até aos 70°C, este material não cumpre os requisitos técnicos exigidos. Por fim, a seleção final foi o policarbonato pois a solução em vidro seria demasiado pesada, de difícil maquinação e necessitaria de uma estrutura de suporte mais complexa.

O projeto foi iterativo. A primeira solução consistia na utilização de painéis quinados de tal forma, que apenas seriam necessários 3 painéis. A Figura 19 ilustra a instalação do painel com as extremidades embutidas nas ranhuras do perfil de alumínio e seria montada uma cunha de fixação junto ao raio de quinagem onde se encontra uma furação pré-existente.

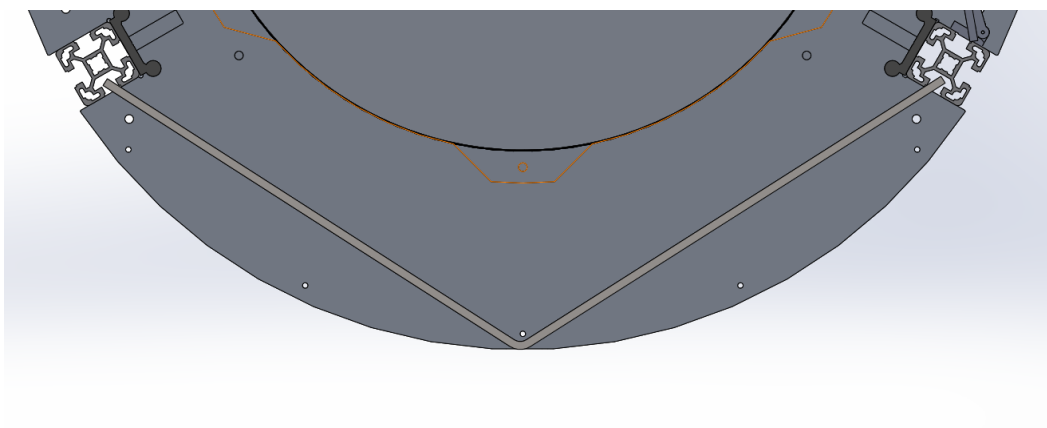


Figura 19 - Montagem de um painel quinado

As portas seriam assentes em dobradiças pivotantes colocadas no topo superior e inferior, o que permitiria a articulação do painel. No topo da Figura 20 demonstra-se a montagem de uma dobradiça pivotante numa furação pré-existente. Em baixo, na mesma figura, ilustra-se a montagem da porta na dobradiça.

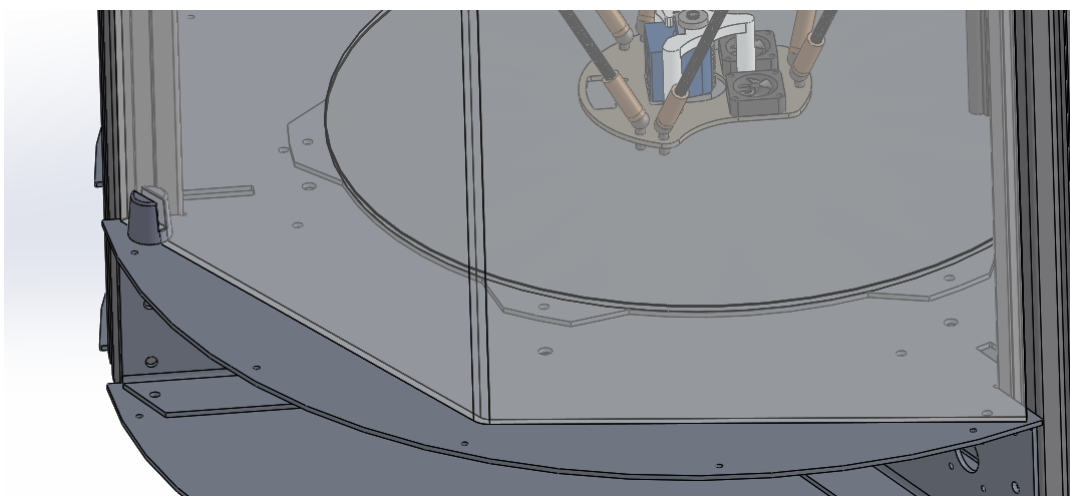
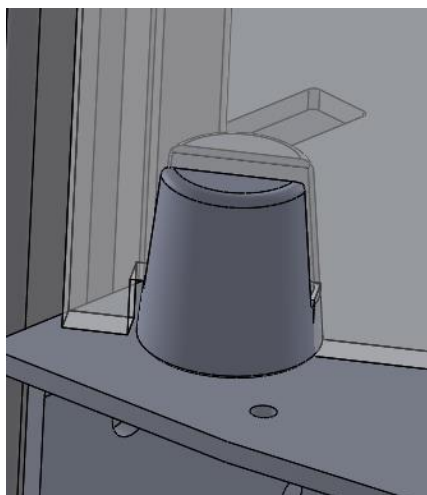


Figura 20 – Topo: Dobradiça pivotante; Baixo: Montagem da dobradiça pivotante com painel quinado

Contudo, esta solução foi rejeitada. Segundo o fornecedor de acrílicos e policarbonato, a quinagem de policarbonato é possível, no entanto, a taxa de sucesso é reduzida e envolve alguma experimentação para diferentes ângulos. Além do mais havia algum receio com a flexão do painel devido à curvatura e comportamento deste com quinagem quando sujeito a 80°C. Por este motivo, embora a solução fosse possível, tornar-se-ia razoavelmente mais cara, pelo que foi imediatamente descartada. Para grandes produções, se fosse o caso, a moldagem a quente seria uma possibilidade, ainda que não seja economicamente viável para um modelo único devido ao preço da construção do molde.

Numa segunda iteração procurou-se utilizar portas fabricadas a partir de painéis retilíneos. Pretendia-se utilizar o sistema de dobradiça pivotante como na solução anterior. Na Figura 21 está ilustrada a montagem da porta e da dobradiça. Contudo, devido à elevada altura das portas, o próprio peso, fletia o painel. Adicionalmente, as

dobradiças pivotantes desenhadas não contemplavam muita margem para ajuste lateral e de profundidade da porta em relação à estrutura.

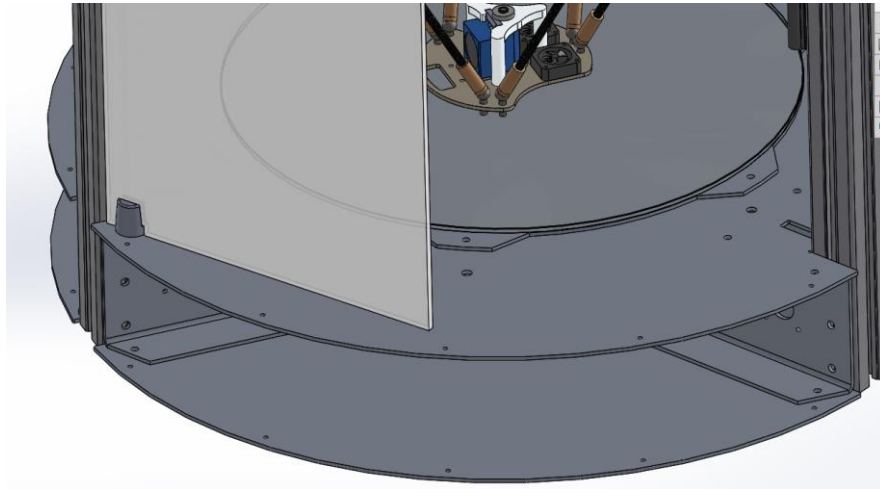


Figura 21 - Montagem de uma porta plana e uma dobradiça pivotante

A terceira iteração pretende resolver os problemas que se verificaram anteriormente. Utiliza-se painéis planos de dimensões iguais de modo a facilitar a intermutabilidade dos mesmo e do processo de corte (Figura 22). As dobradiças pivotantes foram substituídas por dobradiças tradicionais, projetadas para esta situação específica, com possibilidade de ajuste ao longo da calha Bosch e alguns ajustes de forma a controlar as folgas entre os painéis e a estrutura. Teve-se o cuidado de trazer para fora o eixo de articulação da dobradiça, mantendo uma aparência atrativa, de forma a que o painel se afaste do perfil no momento de abertura para facilitar a introdução de vedantes. (Figura 23). Em todas as iterações teve-se o cuidado de minimizar as folgas entre os painéis e a estruturas verticais da impressora assim como a folga painel-painel. Para eliminar as pequenas perdas de ar que surgem devido às pequenas folgas, sugere-se o uso de vedantes que poderiam incluir, por exemplo, um fecho magnético.

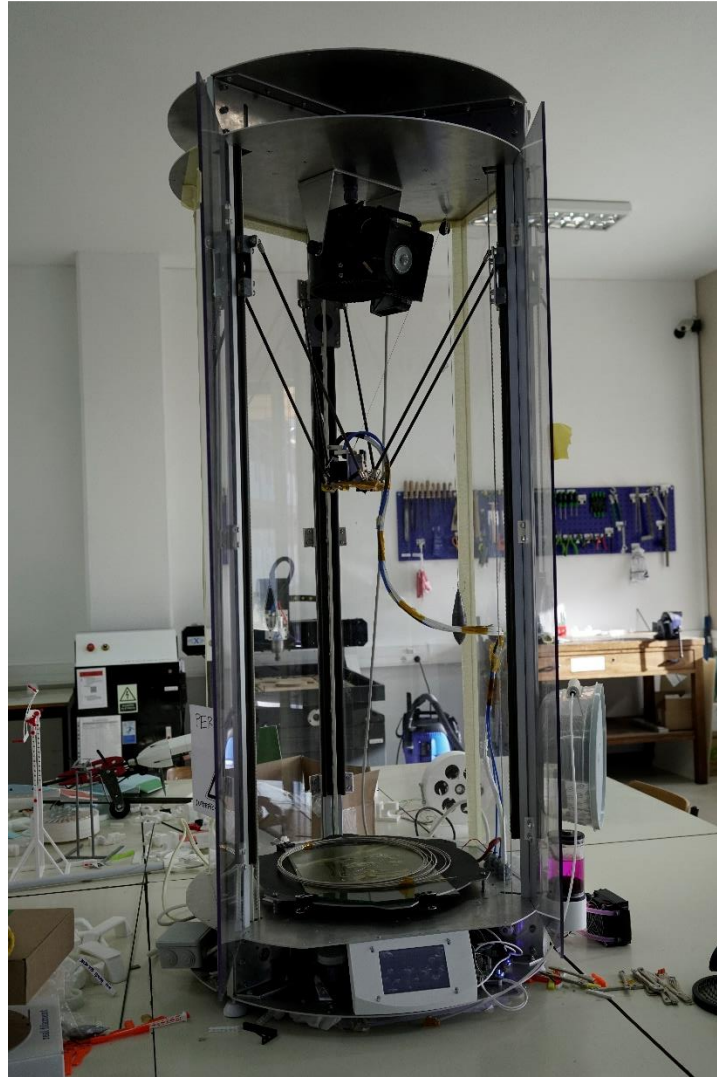


Figura 22 - Alçado frontal da impressora Delta IPS com a versão final das portas para a câmara quente

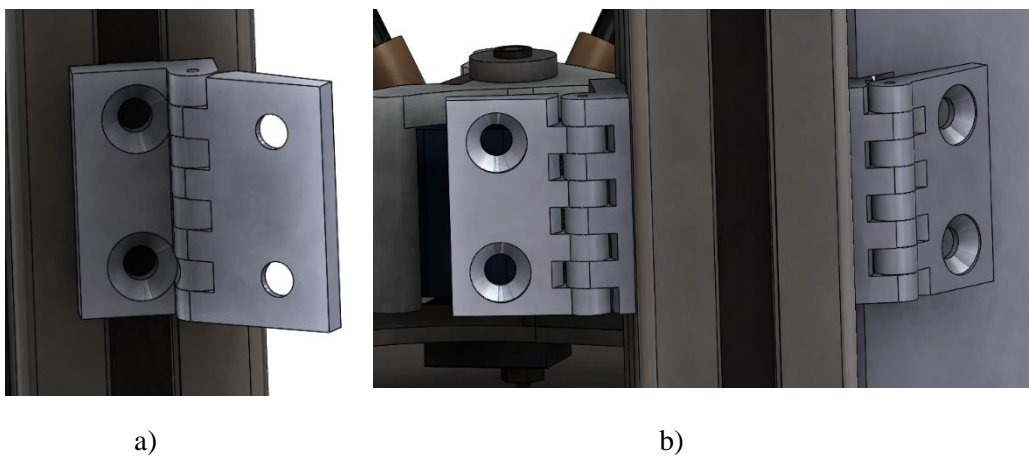


Figura 23 - a) pormenor da dobradiça; b) pormenor da montagem das dobradiças

A compra e o corte dos painéis com as medidas especificadas foram efetuadas na AcrilCoína. De acordo com o fabricante dos painéis, a SABIC™, estes podem estar

expostos a temperaturas contínuas de até 100°C se estiverem sujeitos a esforços leves. Adicionalmente estes painéis de policarbonato têm um revestimento anti-UV para evitar o amarelecimento e a redução da transparência dos mesmos de modo a garantir longos anos de serviço. Em anexo encontram-se os desenhos técnicos dos painéis.

Para montar os painéis na estrutura da impressora, recorreu-se a dobradiças de modo a que os painéis possam ser articulados e se consiga um fácil e rápido acesso ao interior da câmara. Por fim, a montagem das mesmas deve minimizar as folgas entre os painéis e a estrutura da máquina. Como não existiam soluções comerciais facilmente disponíveis, optou-se por construir dobradiças com recurso à manufatura aditiva. O polímero utilizado foi o ABS devido às suas características principais: facilmente maquinável para terminar as peças às tolerâncias exigidas; com resistência térmica às temperaturas de projeto; económico e relativamente fácil de imprimir. Foram tidos em conta os principais esforços a que as duas peças estão sujeitas para que o posicionamento no espaço de impressão maximize a resistência das mesmas, tendo em conta também as características ortotrópicas de uma impressão 3D. Para ligar as duas peças que compõem as dobradiças, um veio de aço inoxidável AISI 304 com um diâmetro de 2mm foi inserido para completar a montagem. Para que a dobradiça ofereça alguma, embora ligeira, resistência ao movimento, a relação furo/veio foi toleranciada para uma ligeiro aperto[33]. Verifica-se que, com recurso a este método, obtêm-se uma porta que ofereça uma ligeira resistência ao movimento. Esta característica é útil para que a porta não realize movimentos bruscos que possam comprometer a resistência da dobradiça quando as portas atingem os limites de curso, ou que se realizem movimentos involuntários, resultantes, por exemplo, de vibrações.

4.3. Aquecimento e controlo de temperatura

Para realizar o aquecimento do ar interior, quantificou-se as fontes de calor existentes na impressora, assim como a energia perdida expectada. Em operação normal, uma impressora 3D utiliza um prato aquecido como base de impressão. A Delta IPS encontra-se equipada com um aquecedor de cama quente de corrente alternada com uma potência nominal de 800W. Atendendo que nem sempre se precisa da temperatura máxima de serviço, este aquecedor é controlado por PWM de modo a controlar-se a temperatura estabelecida. Deste modo, o consumo elétrico equivalente é menor que o nominal. O extrusor da Delta está equipado com um cartucho de aquecimento com potência nominal de 30W. No entanto, este também é controlado por PWM, pelo que o consumo equivalente é menor. Esta fonte de calor é desprezada pois o seu contributo é apenas marginal. Para a impressão de PEEK, pretende-se utilizar o prato de aquecimento

até um máximo de 200°C. Verificou-se, experimentalmente, que para atingir esta temperatura, após a homogeneização do calor por toda a estrutura de suporte do prato e do vidro sobre o qual se realiza a impressão, o ciclo PWM trabalha em aproximadamente 95% do tempo de ciclo, o que corresponde a 760W. Ainda experimentalmente, conferiu-se, através da utilização de uma pinça amperimétrica, que o consumo real é equivalente à aproximação feita pelo PWM.

Para efeitos de cálculo, foram feitas as seguintes aproximações: apenas a área de policarbonato foi considerada; a diferença de temperatura entre o interior da estufa e o exterior do painel são 40°C, o que, por medição posterior, veio a confirmar-se; a temperatura ao longo da altura é constante, ou seja, não há zonas mais quentes que outras e a área de alumínio não é considerada para efeitos de cálculo. Com estas aproximações, é possível calcular as perdas de calor aproximadas e dimensionar um aquecedor com capacidade para o aquecimento da câmara.

A área de policarbonato a ter em conta é dada pelo somatório da área das diferentes portas pelo que:

$$A_{total} = 4 \times \text{Área}_{porta\ lateral} + 2 \times \text{Área}_{porta\ frontal} \quad (4.1)$$

$$= 4 \times (297 \times 1296) + 2 \times (282 \times 1296) = 1.135 \text{ m}^2$$

Assumindo transferência de calor por condução, com a seguinte equação pode obter-se a transferência de calor do interior da câmara para o exterior

$$Q = \frac{C \times A \times \Delta T}{e} \quad (4.2)$$

Onde Q representa o calor total transferido por condução (em W), C representa a condutividade térmica do material ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), A representa a área total (em m^2), ΔT especifica a diferença de temperatura entre as duas superfícies (em K) e, por fim, e representa a espessura do material. Assim, substituindo:

$$Q = \frac{104.6 \times (0.12) \times (80 - 40)}{0.005} = 1743.36 \text{ W}$$

Com estas aproximações adquiriu-se um termoventilador doméstico, de construção metálica, equipado com uma resistência cerâmica PTC com uma potência nominal de 2000W e uma ventoinha elétrica para forçar a circulação do ar através da resistência. O modelo em questão foi selecionado principalmente devido à geometria do mesmo e ao espaço disponível para instalação. A resistência cerâmica, embora seja mais obstrutiva ao fluxo de ar através da mesma, apresenta, do ponto de vista da segurança, uma vantagem ao aquecedor tradicional com fio elétrico resistivo. Sendo uma resistência PTC (Positive Temperature Coefficient), caso se perca o controlo da mesma ou o ventilador falhe, o aumento da temperatura provoca um aumento da resistência do material. Pela lei de Ohm, um maior valor de resistência equivale a uma menor corrente para o mesmo valor de tensão. Deste modo, esta resistência diminui a sua potência útil com o aumento da temperatura, impedindo o sobreaquecimento da mesma. Acrescenta-se que ao calor fornecido à câmara pelo termoventilador é também acrescido 800W de calor fornecidos pela cama quente de impressão. Deste modo, quando a mesa se encontra a trabalhar a 200°C, existe uma potência adicional de 800W. Para temperaturas mais baixas, apenas uma fração desta potência está disponível, o que coloca uma carga adicional no aquecedor do termoventilador.

Para efetuar o controlo do termoventilador procedeu-se à alteração do circuito elétrico original. Os termostatos de segurança presentes no equipamento foram removidos uma vez que limitavam a operação do equipamento a 65°C; e ligações elétricas foram realizadas para se poder efetuar um controlo independente do ventilador e da resistência. Para realizar a comutação dos anteriores, foram adquiridos relés de estado sólido. Estes relés diferenciam-se dos tradicionais contactores uma vez que ao invés do dispositivo mecânico, utilizam um circuito eletrónico para realizar a comutação. O circuito eletrónico possibilita um elevado número de comutações por unidade de tempo (a comutação pode ser realizada a cada meia onda, no instante em que a corrente atinge o valor 0, para que não exista arcos elétricos e cargas excessivas no circuito eletrónico - o que para a frequência da rede europeia se traduz num máximo de 100 comutações por segundo), o que é particularmente vantajoso visto que se pretende utilizar um controlador PID para controlar a temperatura do ar. Adicionalmente, estes relés têm uma vida útil superior face aos contactores. No entanto, para cargas perto do limite de corrente dos mesmos, deve assegurar-se uma dissipação de calor adequada. Os relés adquiridos têm uma capacidade para correntes até 25A. O relé dedicado ao motor do ventilador não necessita de atenção especial, porém, o relé que realize a comutação da resistência deve estar em zona ventilada ou, idealmente, sobre uma superfície dissipadora de calor, por exemplo, a estrutura de alumínio da impressora. O comando

dos relés é feito pelo controlador da impressora que efetua a leitura da temperatura com recurso a um termístor adicionalmente instalado na cabeça de impressão, junto ao local onde se realiza a extrusão de material. Deste modo, caso a temperatura não esteja homogénea ao longo da câmara, é garantido que nas imediações da zona de extrusão a temperatura estabelecida é de facto a temperatura real. As ligações elétricas foram executadas de modo a que a resistência não possa ligar sem que o ventilador seja acionado primeiro, impedindo que esta sobreaqueça. O esquema elétrico executado para o controlo de todos os componentes de potência com tensão alternada de 230V é apresentado na Figura 24.

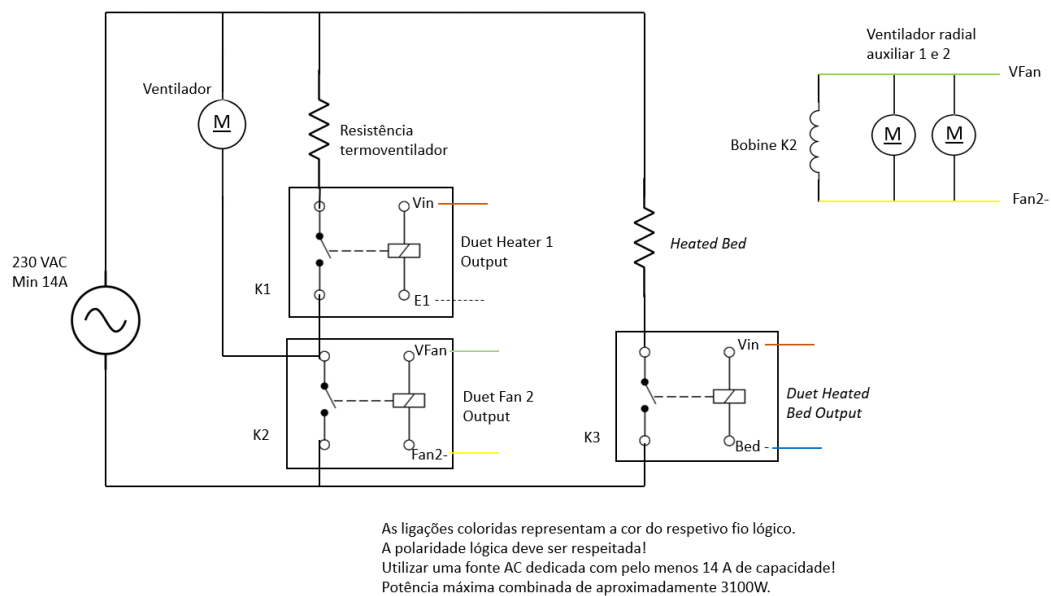
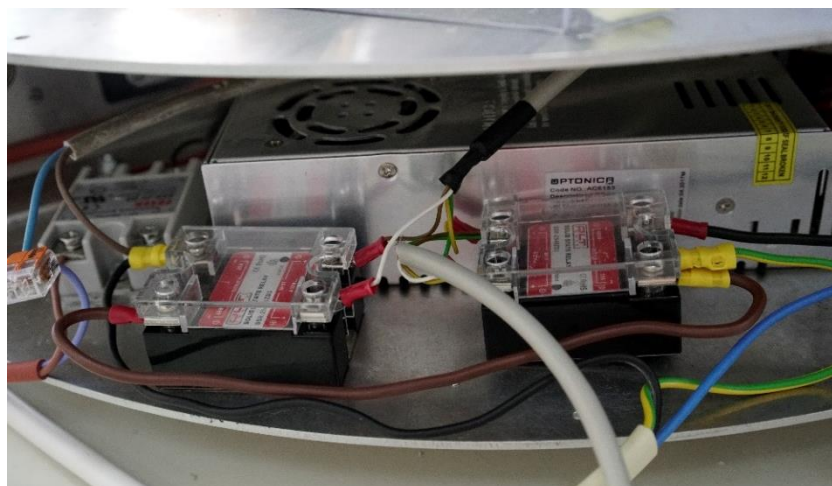


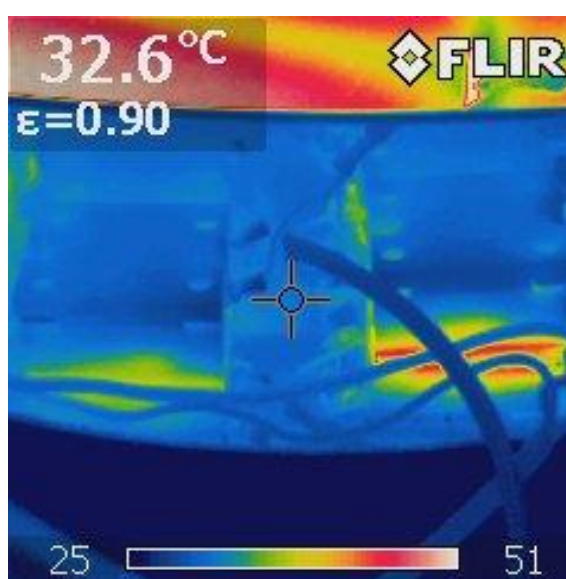
Figura 24 - Esquema elétrico para controlo de circuitos de potência

Pode ainda observar-se na Figura 25 a montagem dos relés e as suas ligações elétricas assim como uma fotografia de infravermelhos para que seja possível observar o calor gerado junto dos mesmos. A fotografia foi realizada após um longo período de funcionamento da impressora. A estrutura de alumínio da máquina proporciona uma boa dissipação de calor, pelo que não se crê serem necessários cuidados adicionais.

Para o termístor, durante a fase de ensaios, foram colocados dois condutores entrançados junto ao restante conjunto de cabos elétrico. Após a aprovação da instalação e da afinação da câmara, foi introduzido um novo cabo para a cabeça de impressão com condutores para todas as necessidades elétricas. Mais detalhes poderão ser consultados à frente.



a)



b)

Figura 25 - a) Instalação dos relés e ligações elétricas. b) Fotografia de infravermelhos para análise da dissipação de calor nos relés

Para acomodar o termoventilador, procedeu-se ao projeto e execução de um suporte simples que, para facilitar a montagem, utiliza a furação pré-existente na estrutura da máquina e do ventilador. Desenhou-se uma estrutura facilmente planificável para se fabricar com recurso à quinagem de uma chapa de alumínio. Numa primeira etapa a chapa é colocada numa fresadora CNC para que sejam abertos os furos compatíveis com a furação já aberta na estrutura da impressora e para se executar o recorte da chapa às dimensões desejadas (Figura 26). Para finalizar o processo de fabrico, realiza-se a quinagem das duas abas do suporte responsáveis pela sustentação do termoventilador (Figura 26). O desenho técnico desta peça encontra-se em anexo, assim como o plano de processo para fabrico.

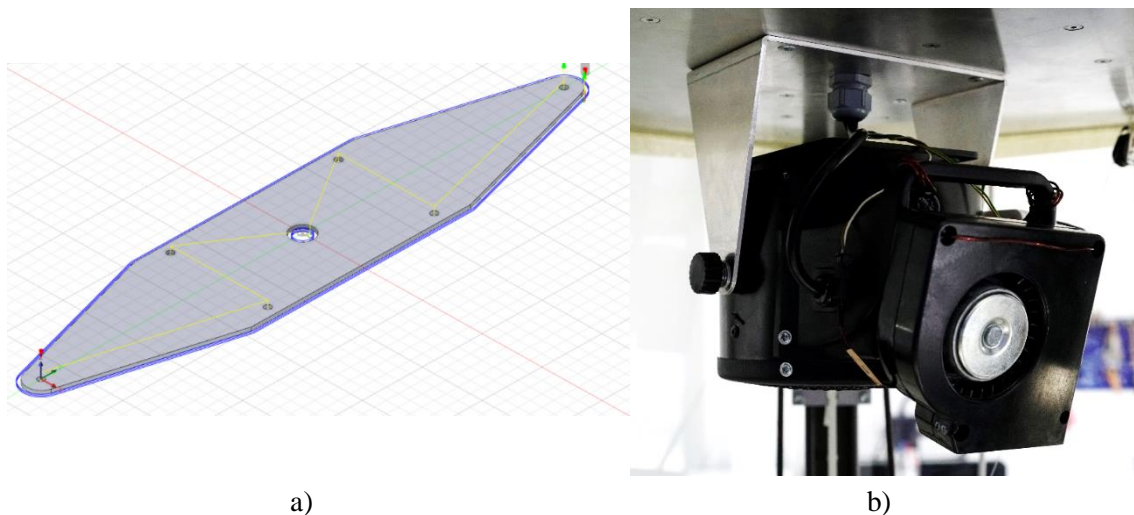


Figura 26 - Suporte ventilador. a) Software CAM gera os percursos da ferramenta de corte. b) Instalação do termoventilador e das ventoinhas suplementares

4.4. Circulação forçada de ar

Por fim, devido à geometria da impressora e ao espaço disponível, a colocação do aquecedor teve de ser realizada no topo da impressora (Figura 26). Este posicionamento é desvantajoso, uma vez que proporciona uma concentração de ar quente no topo da máquina que, devido à sua baixa densidade não desce para o espaço inferior. Verificou-se que sem ventilação forçada adicional não era possível aquecer a câmara de um modo homogéneo. Por este motivo, foram instalados dois ventiladores adicionais para forçar a circulação de ar do topo da impressora para a base. Os modelos selecionados, são ventiladores radiais de caudal elevado, quando comparado com o ventilador do termoventilador adquirido. Os ventiladores radiais foram reutilizados de uma velha impressora 3D Stratasys, que fora abatida, onde executavam as mesmas funções para as quais foram agora selecionados. A instalação de um ventilador está demonstrada na Figura 27.



Figura 27 - Instalação de um ventilador radial com suporte fabricado por impressão 3D

O controlo destes ventiladores é executado diretamente pelo controlador da impressora uma vez que são ventiladores DC com a mesma tensão do controlador, (24V). Estes encontram-se ligados em paralelo com o circuito de comando do ventilador do termoventilador assim os três funcionam em simultâneo. Verificou-se experimentalmente que com recurso à circulação forçada de ar era possível atingir a temperatura de 80°C com uma variação máxima de 4°C nas zonas mais fria. Esta zona costuma situar-se a meia altura quando a cabeça se encontra perto da base da impressora. Se movimentarmos a cabeça de impressão para a meia altura, a temperatura é praticamente homogénea ao longo da altura e por fim se colocarmos a cabeça junto à saída do ventilador verificou-se que a diferença podia ascender a 10°C, obtendo-se leituras na ordem dos 70°C a meia cota quando se mede a temperatura a um quarto da altura de impressão. Todas as medições de temperatura foram realizadas com um equipamento calibrado de medição de temperatura por sonda termopar. As leituras efetuadas pelo controlador com recurso ao termistor foram calibradas, medindo a resistência do mesmo a 20°C e estabelecendo um fator de correção a 80°C, com recurso ao equipamento utilizado anteriormente. As linhas de código em baixo devem ser adicionadas ao ficheiro de configuração do controlador, de modo a que este efetue leituras de temperatura precisas.

```
M305 P2 T100000 B3970 R4700 S"Chamber"
```

Figura 28 - Linha de código G para controlo do ventilador

O que traduz que o input P2 é um termístor com uma resistência a 25°C de 100 kilo Ohm com um valor Beta de 3970 e um fator de correção de 4700. S”____” permite adicionar uma legenda para apresentação na interface gráfica.

4.5. Cabeça de impressão: *hotend* com arrefecimento por ar e extrusão *Bowden*

Inicialmente, a DeltaIPS encontrava-se equipada com um *hotend* arrefecido por ar e com um sistema de extrusão tipo *Bowden*. Um sistema tipo *Bowden* é um mecanismo de alimentação de filamento desacoplado do *hotend*. Neste mecanismo, um motor de passo faz a alimentação do filamento através de um tubo semirrígido de teflon, que guia o material até ao *hotend*. Este tipo de sistema é vantajoso numa impressora Delta, pois reduz a quantidade de massa a deslocar pela cabeça de impressão, visto que esta apenas incorpora o *hotend* e adicionalmente, algumas ventoinhas e outros acessórios, enquanto o motor de passo e o mecanismo de alimentação estão desacoplados da mesma. Na Figura 29, é possível visualizar a cabeça de impressão original instalada na Delta IPS. No entanto, a cabeça de impressão fora fabricada em alumínio e o aumento da temperatura ambiente levaria à expansão da mesma, o que resultaria em empenos e à consequente perda de precisão. Verificaram-se outros problemas como uma grande distância desde as ventoinhas até ao *nozzle*, o que reduz o caudal de ar responsável pelo arrefecimento do polímero extrudido. O sensor de altura, responsável pela medição da distância entre o *nozzle* e a base de impressão, que permite aferir se existem variações de cota neste plano ou empenos, encontra-se demasiado afastado do *nozzle*, o que se traduz em medições erradas devido ao efeito descrito pelo fabricante como *tilt error*.

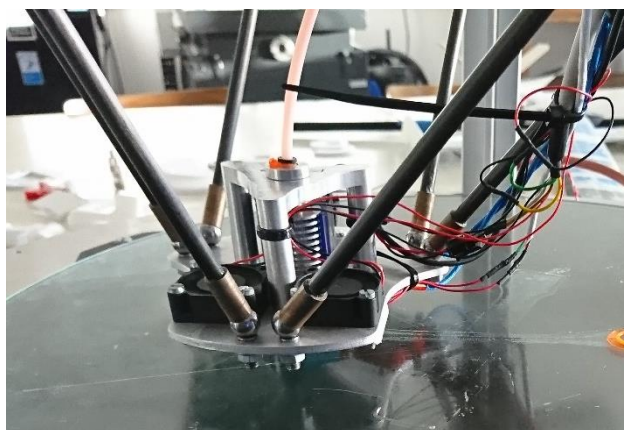


Figura 29 - Cabeça de impressão original da Delta IPS

Para solucionar estes problemas, projetou-se uma nova cabeça de impressão. O sensor foi colocado o mais próximo possível do *nozzle* e as ventoinhas de arrefecimento

foram deslocadas para as proximidades do anterior. Para direcionar o caudal de ar, foram também desenhadas novas condutas de ar. Foram posicionados alguns furos distribuídos pela cabeça para facilitar a passagem e aperto dos cabos de controlo e aquecimento, impedindo que estes andem soltos e sujeitos a esforços de flexão que reduzam a vida útil dos mesmos. Uma vez que a cabeça de impressão é suspensa por varetas com rótulas magnéticas, procurou-se garantir que o centro de massa da estrutura era aproximadamente coincidente com o centro do lugar geométrico definido pela posição das rótulas magnéticas. A cabeça foi maquinada a partir de uma chapa de fibra de vidro, pois esta é um mau condutor térmico evitando empenos e má condutora elétrica - o que permite construir o circuito de deteção de ligação entre varetas - e estava facilmente disponível no Politécnico de Setúbal. A maquinação foi efetuada numa fresadora CNC para a qual se efetuou um programa através da ferramenta CAM do software Fusion360 (Figura 30). A maquinação da mesma foi particularmente difícil devido à elevada abrasividade da fibra de vidro aliada à falta de ferramentas específicas para este tipo de operação, uma vez que apenas ferramentas de corte convencionais que estavam disponíveis nas oficinas e laboratórios do IPS. O plano de processo para a execução desta peça encontra-se em anexo. Na figura 26 podemos observar a peça final.

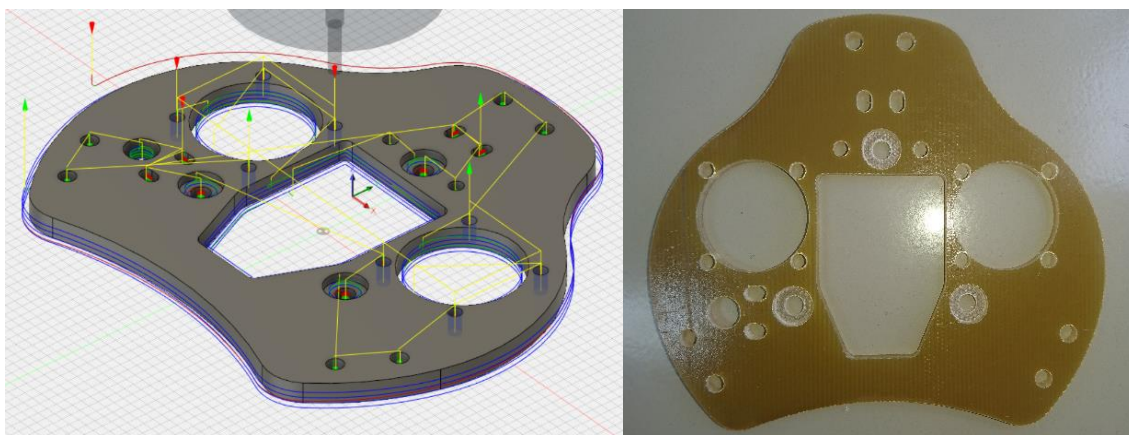


Figura 30 - Percursos da ferramenta de corte gerados por CAM e peça final maquinada

Verificou-se, durante os testes iniciais, que a força magnética das rótulas era insuficiente, o que resultou em inúmeras impressões falhadas, pelo que se adaptou as varetas originais para que as mesmas pudessem acomodar mais um magneto para obter uma maior força magnética. Passou-se também um condutor elétrico entre as rótulas fêmeas montadas nas varetas e outro condutor entre rótulas macho que estão montadas na cabeça de impressão e nos carros das guias verticais. Este circuito elétrico atua como uma proteção adicional (figura 30). Caso uma das ligações entre rótulas falhe, por exemplo, dando-se uma prisão da cabeça de impressão, o controlador da impressora

detetará que este circuito foi aberto; este iniciará uma rotina de pausa para salvaguardar a segurança do equipamento. O operador poderá posteriormente reparar a avaria, e se existirem condições, poderá retomar a impressão, evitando o desperdício de material e energia.

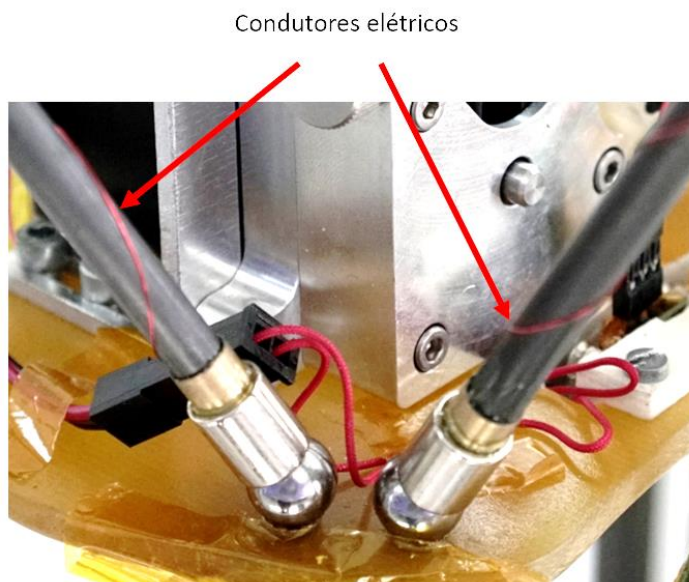


Figura 31 – Condutores elétricos para circuito de deteção da união entre rótulas magnéticas

4.6. Cabeça de impressão: *hotend* e extrusor direto com arrefecimento por água

Verificou-se junto do fabricante do equipamento que o convencional extrusor com arrefecimento por ar não era capaz de operar em ambiente aquecido às temperaturas desejadas e necessárias para a impressão de PEEK. Dadas as circunstâncias, recorreu-se a alternativas fazendo uma análise de possíveis soluções presentes no mercado.

A maioria das soluções convergem para a remoção de calor do *hotend* via introdução de ar frio proveniente do exterior da máquina ou através da remoção de calor usando água por circuitos fechados, como num automóvel. Decidiu-se que o mais prático e energeticamente eficiente seria a remoção de calor localizado ao invés da introdução de ar fresco na câmara, prejudicando o controlo do aquecimento e colocando o aquecedor sobre carga desnecessária. Algumas soluções encontradas foram os produtos da E3D™, Titan Aqua, um extrusor direto com arrefecimento do *hotend* e do motor de passo responsável pela alimentação de material, e os produtos da DyzeDesign™, com um

produto semelhante ao anterior todo construído em aço, mas com menos modularidade e incompatível com o *hotend* montado originalmente (Figura 32). Após alguma discussão sobre as vantagens e desvantagens dos dois modelos, optou-se pela modularidade da primeira solução, assim como a compatibilidade parcial com o equipamento já montado na impressora.

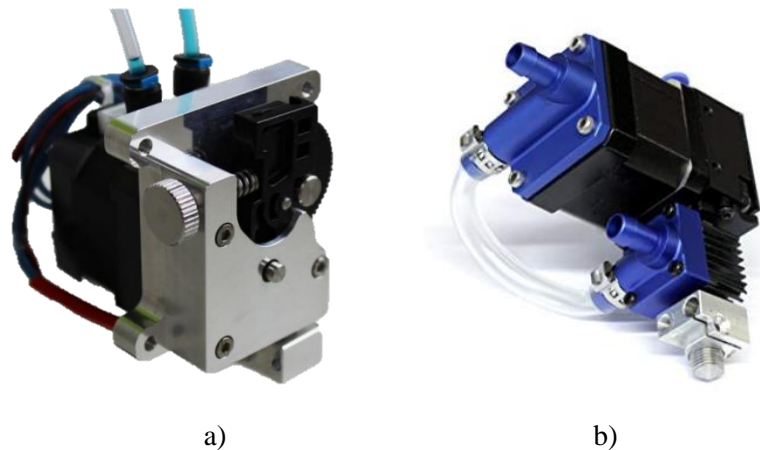


Figura 32 – a) E3D Aqua b) Dyzend Pro [34], [35]

O Titan Aqua, sendo do mesmo fabricante que o *hotend* original, o E3D V6, utiliza o mesmo sensor de temperatura, um cartucho de aquecimento com as mesmas dimensões e a montagem do heatbreak e do bloco de aquecimento partilham as mesmas configurações. Um dos pilares basilares da marca é que todo o seu equipamento tenha o máximo de intermutabilidade, podendo-se facilmente melhorar ou substituir apenas determinado componente. O Titan Aqua consiste num conjunto de peças em alumínio maquinado que dão montagem ao sistema de extrusão e ao *hotend*. Nestas peças, foram abertos canais onde se fará a circulação de um líquido refrigerante para a remoção do calor aos componentes críticos, nomeadamente, ao motor de passo e à zona fria do *hotend*, para evitar que se dê a fusão de material demasiado cedo no percurso do mesmo, como visto anteriormente. Como fluído refrigerante utilizou-se uma mistura de iguais partes de água destilada e fluído para radiador automóvel G13, composto essencialmente por uma mistura de etilenoglicol, enchendo o vaso expensor até ao limite especificado.

Para a impressão de PEEK adquiriu-se as peças necessárias e optou-se pela seguinte configuração: extrusor direto com arrefecimento a água e resolução de 52 passos completos por mm de filamento alimentado (pode aumentar-se a resolução utilizando microstepping); heatbreak em titânio (o titânio utilizado garante uma menor condução térmica do que o aço inoxidável utilizado no extrusor original) um bloco de aquecimento em liga de cobre com revestimento eletrolítico de níquel (os blocos convencionais de alumínio sofrem transformações de fase antes de se atingir as temperaturas pretendidas

recorre-se assim a ligas de cobre, onde para evitar a oxidação do mesmo, quando exposto a altas temperaturas por períodos prolongados, aplica-se um revestimento de níquel); um *nozzle* de aço endurecido para evitar a abrasão e o desgaste quando submetido a temperaturas elevadas, um cartucho de aquecimento para altas temperaturas (temperatura máxima de funcionamento contínuo de 500°C) com 65W de potência, onde o original apenas apresenta uma potência de 30W (temperatura máxima de funcionamento contínuo de 300°C); um sensor de temperatura por termoresistência PT100 com capacidade de leitura até 450°C.

Deixa-se apenas uma pequena nota em relação ao material adquirido: o *nozzle* de aço endurecido perde a resistência à abrasão quando submetido prolongadamente a temperaturas iguais e superiores a 400°C, pelo que a sua resistência com materiais extremamente abrasivos como polímeros reforçados com fibras de vidro, fibras de carbono, madeira, partículas fotoluminescentes, metais ou outras encontra-se comprometida ou mesmo nula. Após as impressões em PEEK, recomenda-se que não se utilize este *nozzle* para a impressão dos materiais supracitados[36].

Dadas às diferentes geometrias destes equipamentos e às diferentes necessidades elétricas, foi necessário redesenhar a cabeça de impressão. Numa primeira iteração tentou-se adaptar a solução maquinada anteriormente, mas verificou-se que as furações existentes não seriam compatíveis com as localizações das fixações do novo extrusor. Procedeu-se ao projeto de uma nova cabeça, atendendo aos requisitos anteriormente verificados e às novas necessidades. Verificou-se, durante o projeto que devido à assimetria do extrusor e às implicações geométricas de uma impressora Delta, que existia um compromisso entre o equilíbrio do centro de massa com o lugar geométrico de centro das posições das rótulas magnéticas e a área útil de impressão (que sofria uma redução significativa, uma vez que a coincidência do centro de massa com o centro geométrico implica que a posição do *nozzle* esteja ligeiramente desviada deste ponto). Numa impressora de geometria Delta, a área de impressão máxima ocorre quando o *nozzle* se encontra localizado no centro geométrico da posição das rótulas que sustentam a cabeça de impressão, verificando-se o círculo máximo que define os limites máximos de impressão. Quando se verifica um offset entre o *nozzle* e o centro geométrico das rótulas, a área útil de impressão diminui drasticamente uma vez que a área de um círculo é proporcional ao quadrado do raio. Em conversação, foi determinado o rácio deste compromisso, sendo que se optou por dar preferência à área máxima de impressão em detrimento de um desequilíbrio de massas na cabeça de impressão.

Uma vez adotado este compromisso, efetuou-se o desenho da cabeça, o respetivo CAM (Figura 33) e procedeu-se, com a informação obtida previamente na maquinação de fibra de vidro, à execução de uma nova cabeça em fibra de vidro. Foram também desenhados suportes para as fixações necessárias, assim como novas condutas para guiar o ar para arrefecimento do polímero extrudido, recorrendo-se à impressão 3D - utilizando filamento de ABS para a produção destas peças. Mais tarde verificou-se que os suportes para fixar o extrusor à cabeça de impressão não aguentavam, à temperatura de 80°C, os esforços a que eram sujeitos, pelo que estas peças foram produzidas através de corte por fresagem CNC de uma chapa de aço às dimensões pretendidas e com as furações necessárias à fixação do extrusor na cabeça de impressão. Posteriormente foi realizada a quinagem da chapa para obter um suporte com um perfil em L, igualmente rígido apesar de marginalmente mais pesado que a solução inicialmente pensada (Figura 34). Chama-se à atenção para a necessidade de proteção térmica do sensor de altura devido à proximidade deste com o *hotend*. O sensor de altura foi protegido com diversas camadas de fita *Kapton* em redor do sensor e do seu suporte. Deve-se verificar regularmente o estado da fita e, se necessário, retirar a fita velha e reaplicar fita nova abundantemente.

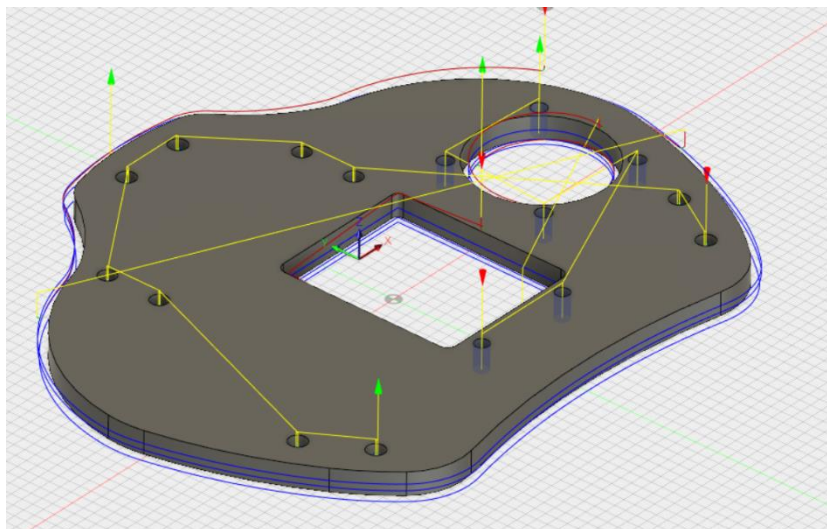


Figura 33 - Percurso da ferramenta de corte gerado pelo CAM



Figura 34 – Suporte de fixação produzido por impressão 3D e suporte produzido por quinagem

Por fim, veio a verificar-se, em fase de testes, que a massa do novo extrusor e *hotend* é demasiado elevada para um funcionamento fiável por parte das rótulas magnéticas, registando-se vários incidentes, nomeadamente separação das rótulas magnéticas durante os ensaios preliminares. A fim de aumentar a fiabilidade, colocou-se um contrapeso guiado por um sistema de roldana, semelhante ao contrapeso de um elevador, onde a massa do contrapeso é ligeiramente inferior à massa da cabeça de impressão e cabos elétricos. Assim, caso se dê a falha total das seis rótulas magnéticas que sustentam a cabeça de impressão, esta cairá a uma velocidade lenta ocorrendo mesmo a paragem quando parte dos cabos elétricos assentam na base da impressora e o seu peso deixa de exercer tração no cabo do contrapeso. Esta medida mitiga a probabilidade de ocorrência de uma colisão catastrófica da cabeça de impressão com a base da impressora (especialmente se ocorrer a falha numa cota vertical elevada). A implementação deste mecanismo pode observar-se na Figura 35 e salienta-se que este apresenta uma vantagem secundária na medida em que se verifica um aumento da segurança do próprio equipamento.



Figura 35 - Moitão e contrapeso da cabeça de impressão arrefecida por água

Na Figura 36 podemos observar a montagem completa da cabeça de impressão, onde se pode observar o extrusor em alumínio, a receção da cablagem hidráulica e elétrica no aliviador de tensão dos cabos, fabricado por impressão 3D em Nylon e duas rótulas magnéticas com um pequeno fio condutor que parte das rótulas em direção à outra extremidade das varetas. Cada vareta funciona como um interruptor que, ao soltar-se, abre o circuito, iniciando uma paragem da impressão.

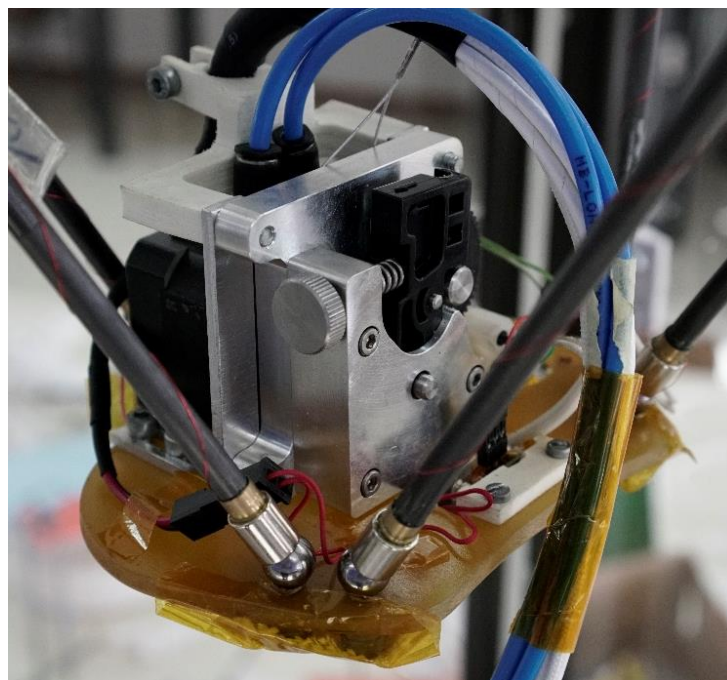


Figura 36 - Montagem da cabeça de impressora

Verificou-se ainda que o sistema de arrefecimento funciona corretamente. Recorrendo à câmara de infravermelhos, pôde-se observar uma diferença de 5°C a 6°C entre o fluído refrigerante proveniente do *hotend* e o fluído que abandona o radiador. Podemos observar na figura 33, nas duas imagens superiores, a diferença de temperaturas entre a entrada e a saída de fluído refrigerante, assim como podemos verificar que o extrusor encontra-se a uma temperatura inferior à da câmara e que a condução de calor do *hotend* para o extrusor não se propaga pelo mesmo. Todas as imagens foram produzidas com a impressora aquecida e estabilizada às temperaturas de impressão de PEEK. O extrusor, embora esteja aquecido a 400°C, devido ao limite da câmara de infravermelhos, apenas se pode registar uma temperatura máxima de 360°C

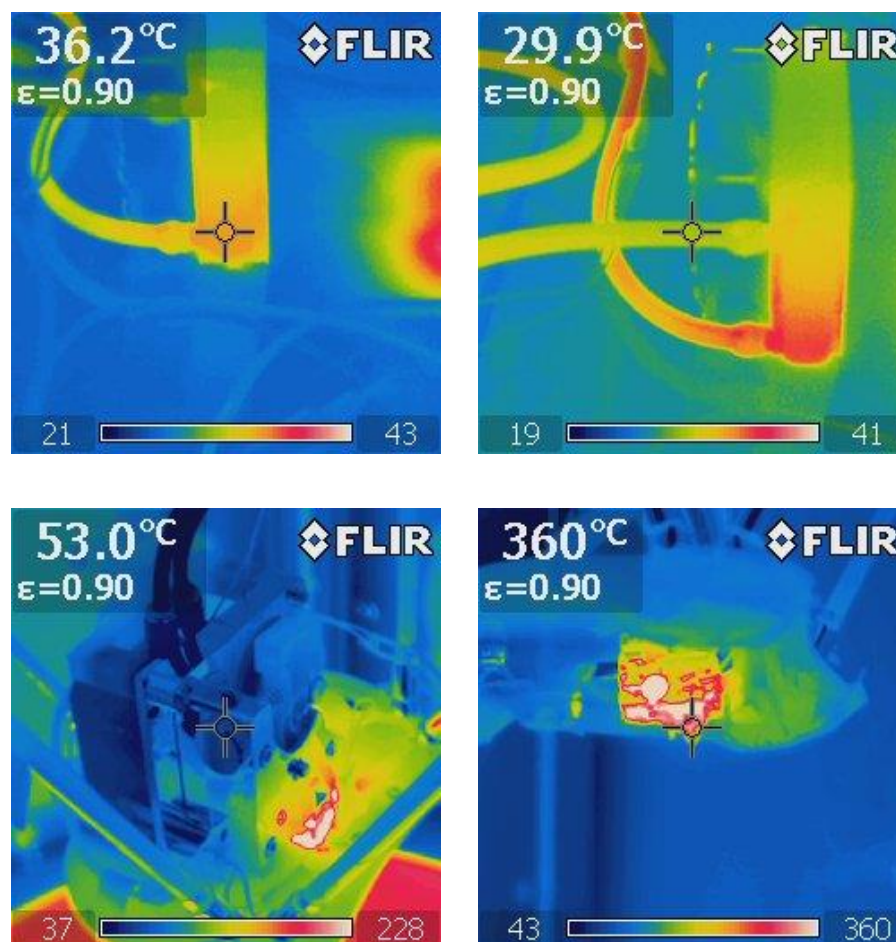


Figura 37 - Imagens infravermelhos de vários componentes da impressora. Em cima entrada e saída de água do radiador, em baixo análise da temperatura do extrusor e hotend.

4.7. Cabo elétrico e hidráulico

Para fornecer energia e realizar as medições necessárias ao funcionamento do novo sistema de extrusão com arrefecimento por água, foi construído um cabo elétrico adequado às necessidades assim como uma tubagem hidráulica para o transporte de

fluido refrigerante até à cabeça de impressão. Numa primeira instância optou-se por utilizar um cabo da fabricante Igus™ indicado para aplicações de robótica, com o número de condutores necessários e suficientes para as ligações elétricas. Verificou-se que este cabo não era adequado para esta situação, pois apresentava demasiada rigidez para ser utilizado com a montagem pretendida. Recorreu-se assim à utilização de cinco cabos com quatro condutores e cobertos por uma malha metálica para efetuar o chicote elétrico. Estes cabos dispõem de um revestimento em *teflon* o que lhe garante uma operação em ambientes de até 270°C (podendo estar em contacto com o prato aquecido) e a malha, quando ligada à massa, reduz as interferências eletromagnéticas entre os condutores. Esta característica é particularmente útil pois no mesmo cabo encontram-se condutores para alimentação do motor de passo, sujeitos a vários pulsos por segundo e condutores para a ligação das termopares responsáveis pela medição da temperatura do *hotend* e da câmara. Pretendendo-se uma leitura precisa, é importante que estes condutores não estejam sobre a influência de outros campos magnéticos, pelo que se recomenda a ligação das malhas à massa para evitar influências eletromagnéticas.

Pretende-se que as duas cabeças de impressão sejam intermutáveis, pelo que o chicote elétrico deve assegurar as necessidades das duas cabeças. Assim, as ligações entre os componentes e o chicote foram asseguradas por fichas para fácil desmontagem e montagem das duas cabeças. As fichas foram cravadas de modo a que os condutores possam ser partilhados para efetuar ligações distintas das duas cabeças, sendo apenas necessário trocar os *inputs* e *outputs* no controlador. A título de exemplo, os condutores utilizados para efetuar a alimentação do motor de passo podem ser usados para o controlo da ventoinha de arrefecimento do extrusor, na cabeça arrefecida por ar, devendo apenas retirar a respetiva ficha da saída para controlo de motores no controlador e colocá-la na saída para controlo de ventoinha efetuando, a mesma alteração nas respetivas cabeças de impressão. Na Figura 38 pode observar-se a passagem do chicote elétrico, assim como dos tubos hidráulicos para o interior da câmara recorrendo à utilização de buçins para minimizar as perdas de ar e para um melhor aspeto estético.

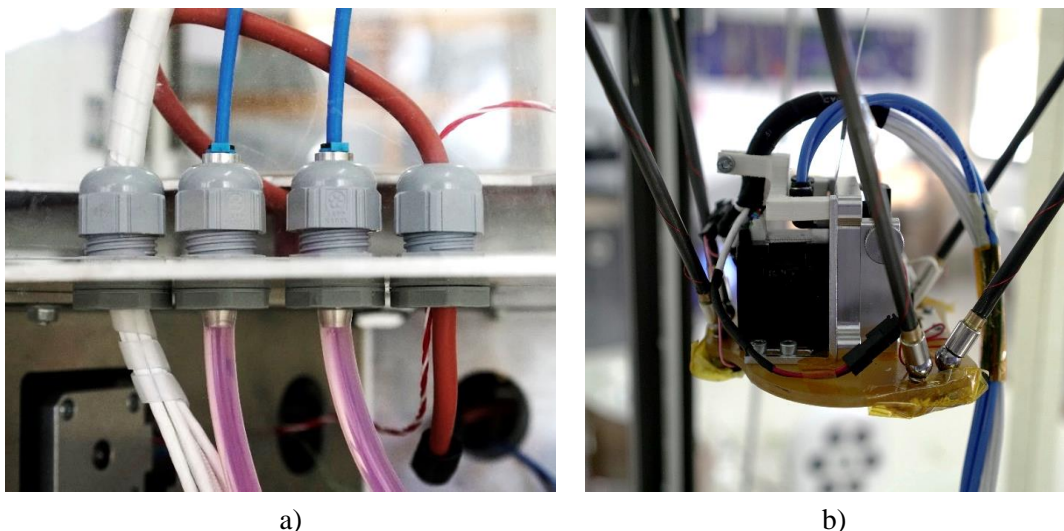


Figura 38 – a) Passagem dos cabos elétrico e tubagens hidráulicas do exterior para o interior da câmara. b) receção dos cabos e tubagens hidráulicas na cabeça de impressão

Para o fornecimento de água foram instalados dois tubos de poliuretano que asseguram o transporte de fluido refrigerante frio até à cabeça de impressão e de fluido quente da cabeça de impressão para o radiador, responsável pela dissipação de calor. O circuito utilizado para refrigeração é bastante comum com o sistema utilizado num automóvel. Começando o circuito pela bomba, o fluído é conduzido até ao extrusor e ao *hotend*. Dada a transferência de energia, o fluído é então conduzido até um radiador com passagem de ar forçada, onde troca energia com o exterior. O fluído, agora frio, é devolvido ao vaso expansor, onde depois segue novamente até à bomba. O radiador, a bomba, o vaso expansor e parte da canalização de fluído são apresentados na Figura 39.

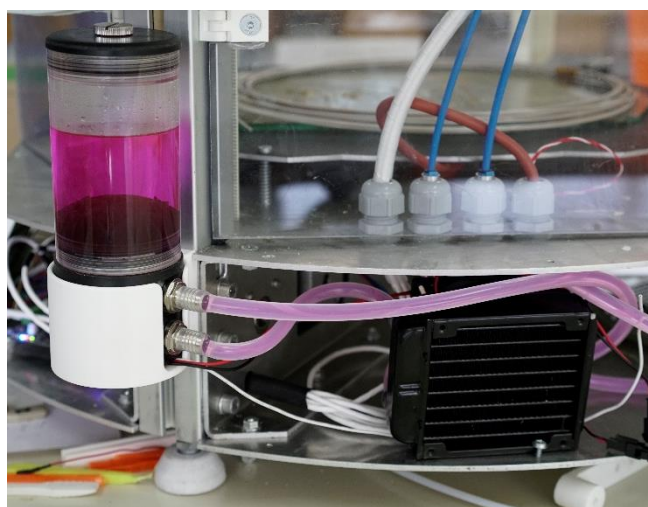


Figura 39 - Instalação da bomba, radiador e vaso expansor.

Para controlo deste sistema, a bomba e a ventoinha respondem ao sensor de temperatura colocado no *nozzle*. Quando a câmara está ativa ou se aquece o *hotend* a temperaturas superiores a 45°C, o controlador dá ordem para que a circulação de fluído se inicie. Uma vez que a bomba e a ventoinha do radiador funcionam com uma tensão nominal de 12V DC e o controlador opera com uma tensão de 24V DC, a ligação dos componentes não pode ser direta. Foi adquirida uma fonte de alimentação de e um relé com uma bobine de 24V para efetuar a alimentação e o controlo, respetivamente. Como o relé adquirido não dispõem de proteção contra arco elétrico entre o circuito de potência e o circuito de comando, nem proteção contra picos de corrente provenientes da bobine após a comutação, foi instalado um pequeno circuito com um diodo para evitar danos possivelmente irreparáveis no controlador. Resistências *pull up* em série com a bobine foram adicionadas ao circuito analógico para que o circuito digital reconheça a resposta em degrau do sistema e ajudam na dissipação do pico de corrente aquando da comutação da bobine. Um condensador foi também instalado para assegurar que na bobine do relé existe sempre tensão quando o circuito deve estar fechado, uma vez que a saída lógica do controlador disponível para comutar a bomba é uma saída com PWM e, portanto, existe uma frequência de comutação, que, embora rápida, provoca a degradação acelerada da bobine. Salienta-se que a utilização de um diodo e de um condensador atrasam ligeiramente a resposta do relé quando se pretende que o circuito abra, uma vez que o condensador fornecerá por alguns instantes a tensão necessária à bobine. Este atraso é na ordem dos milésimos de segundo e para a aplicação em concreto não é relevante. A Figura 40 mostra a fonte de tensão de 12V DC, assim como o circuito descrito, embora apenas o diodo e o relé estejam visíveis.

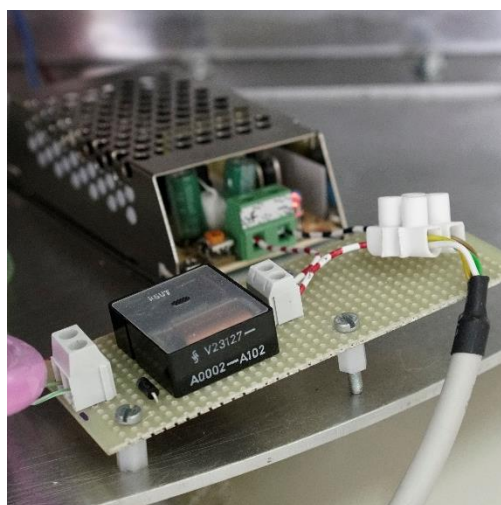


Figura 40 - Transformador 12V e circuito de comando

O projeto deste circuito elétrico, assim como a supervisão da execução do mesmo, ficaram a cargo do professor Manuel Ferreira, professor adjunto do IPS, que colaborou também na verificação da instalação elétrica efetuada na impressora, nomeadamente nos circuitos de potência em corrente alternada para a alimentação e controlo do termoventilador assegurando a segurança de utilizadores, assim como da própria máquina contra falhas de origem elétrica. O esquema é apresentado na Figura 41, onde K4 representa o relé cuja bobine é controlada pelo controlador da impressora. As cores das ligações elétricas representam a cor dos condutores instalados e, embora os equipamentos estejam protegidos contra a inversão de polaridade, é recomendado respeitar a polaridade na instalação (Figura 42).

Circuito para controlo do circuito de refrigeração

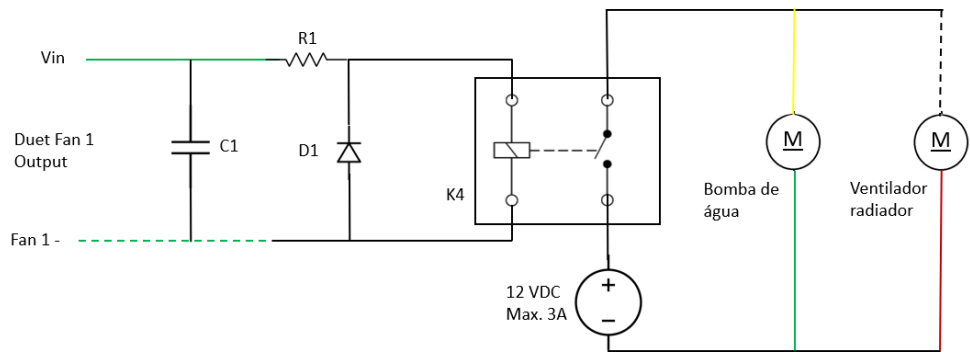


Figura 41 - Circuito elétrico para controlo do circuito de refrigeração

Ligações Chicote elétrico: Pinos de I/O do Duet
Wifi para conetores na cabeça de impressão

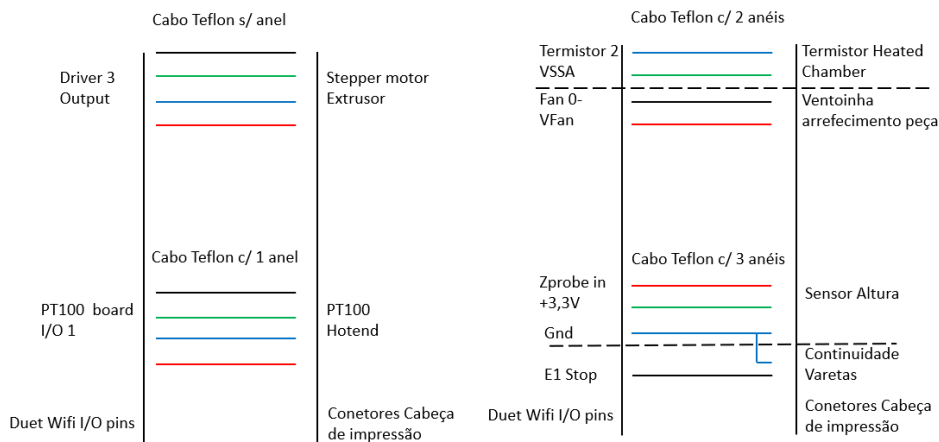


Figura 42 - Ligações de I/O do Duet Wifi para conetores na cabeça de impressão

4.8. Configuração do controlador e calibração da impressora

Para que o termovenilador, a bomba de água, ventoinhas adicionais e restantes circuitos possam funcionar corretamente, o controlador teve de ser configurado para as novas exigências. Os circuitos de controlo de temperatura requerem um apertado controlo, o que torna necessário introduzir um controlo proporcional, integral, derivativo (PID). Os restantes sistemas, como são mais simples, funcionam apenas com um controlador proporcional.

Para o controlo da temperatura do extrusor, da cama quente e da câmara, é definido um controlador PID. O Duet Wifi permite definir o controlador de duas maneiras distintas. Pode optar-se por introduzir os valores clássicos de um PID, ou seja, o valor da constante P, I e D ou modelar a resposta do sistema de segunda ordem que define o aquecedor através do valor de ganho máximo, constante de tempo e valor de tempo morto. A definição da resposta do sistema é mais vantajosa em comparação ao método PID, pois o controlador, através do cálculo da variação de temperatura e da taxa de variação, a cada determinado número de ciclos de processamento, ajusta os valores clássicos de PID à situação presente. Outra vantagem é que este método controla com rigor a temperatura para uma maior gama de temperaturas alvo, ou seja, se a curva de resposta for calculada para uma temperatura de 205°C, tipicamente utilizada para PLA, o estabelecimento de uma temperatura de, por exemplo, 230°C não sofrerá sobrelevação ou erros de variação muito maiores do que para o valor de 205°C[37]. A Figura 43, representa o diagrama de blocos de controlo do aquecimento utilizado para o *hotend*, cama quente e aquecimento da câmara e, também a resposta do *hotend* ao aquecimento até 400°C

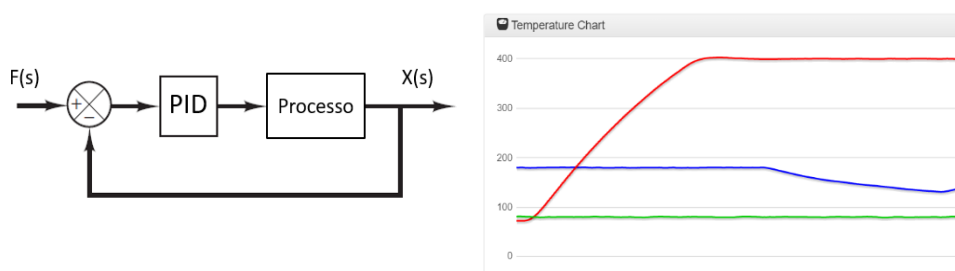


Figura 43 - Diagrama de controlo de temperatura [37] e gráfico de resposta do hotend ao aquecimento. A vermelho: temperatura do hotend. A azul: temperatura da cama quente. A verde: temperatura da câmara

Para tal, executa-se para cada um dos equipamentos um ciclo de *auto-tuning*, dando a instrução da Figura 44.

M303 Hxx Snnn Pmm

Figura 44 - Linha de código G para ciclo de calibração do controlador PID

Onde Hxx representa o número do aquecedor, Snn o valor da temperatura alvo e Pmm o valor de PWM a aplicar.

- H0 específica a saída referente ao aquecedor da cama quente;
- H1 específica o aquecedor do extrusor;
- H2 específica a resistência do termoventilador;
- S240 específica uma temperatura alvo de 240°C, por exemplo;
- P0.80 específica um PWM em 80% de um ciclo;

Após a execução do comando anterior deve fornecer-se o comando da Figura 45.

M307 Hxx

Figura 45 - Linha de código G para apresentar o relatório do ciclo de calibração

Onde os valores possíveis de H são iguais aos anteriores. Este comando reporta os valores obtidos pelo *auto-tuning*. Recomenda-se realizar pelo menos três ciclos de afinação, sempre iniciando a afinação a partir da temperatura ambiente, uma vez que o processo é iterativo quantos mais ciclos se executar, melhor é a modelação da resposta do sistema. Uma resposta ao comando M307 apresenta o seguinte aspeto (Figura 46).

M307 H1 A350 C140 D3.2 I1 V24.2 F100 S1.0

Figura 46 - Relatório do ciclo de calibração apresentado em código G

- H1 específica o aquecedor do extrusor;
- A350 específica o valor de ganho estático do sistema de segunda ordem;
- C140 específica o valor da constante de tempo do sistema de segunda ordem;
- I1 específica o tipo de PWM (0 realiza controlo normal, 1 realiza controlo tipo Bang-Bang invertido e 2 realiza controlo PWM invertido. As inversões de controlo, neste controlador, devem ser utilizadas para sistemas onde se pretende controlar o fornecimento de frio, por exemplo

o controlo de uma resistência de Peltier com leitura no lado frio da mesma.);

- D3.2 especifica o valor do tempo morto do sistema de segunda ordem;
- V24.2 especifica o valor da tensão de alimentação (parâmetro opcional - ajuda o controlador a ajustar o fornecimento de corrente aos aquecedores quando a fonte de alimentação varia a tensão, por exemplo, em situação de elevada carga);
- F100 especifica o valor da frequência de PWM (parâmetro opcional);
- S1.0 especifica uma fração do comprimento de pulso por cada ciclo;

Esta resposta deve ser copiada e compilada no ficheiro de configuração da impressora, para que o aquecimento seja regulado. Deve executar-se várias vezes para os diferentes aquecedores. Recomenda-se que sejam executados apenas com supervisionamento do operador, uma vez que o controlador desliga a análise lógica e a execução de medidas de segurança contra sobreaquecimentos e circuitos abertos.

Para configurar os novos ventiladores deve introduzir-se as linhas de código da Figura 47.

```
M106 P0 H-1  
M106 P1 H1 T45  
M106 P2 H-1
```

Figura 47 - Linhas de código G para controlo dos ventiladores

O que traduz, linha a linha, ventilador 0 sem controlo termostático. Ventilador 1 com controlo termostático em função da resposta do aquecedor 1, o aquecedor do *hotend*, com temperatura de disparo de 45°C. Ventilador 2 sem controlo termostático.

Note-se que o ventilador 1, pode ser de facto a ventoinha responsável pelo fluxo de ar sobre as alhetas do dissipador de calor da cabeça de impressão com arrefecimento por ar, ou o comando do relé responsável pelo controlo da bomba de água e da ventoinha do radiador da cabeça de impressão com arrefecimento por água.

As linhas da Figura 48 devem ser adicionadas apenas aquando da operação da cabeça com arrefecimento de água, pois especificam o *offset* de posição do *nozzle* em relação ao centro geométrico da cabeça de impressão, assim como o *offset* da posição do sensor de medição de altura.

M665 R237.472 L477.403 B190 H847.181 X-0.391 Y0.390 Z0 G31 P500 X12 Y0 Z2.25

Figura 48 - Linhas de código G que definem a área e a posição do sensor de altura para a configuração arrefecida por água

Quando utilizada a cabeça de impressão arrefecida por ar estas linhas devem ser substituídas pelas linhas da Figura 49.

M665 R237.472 L477.403 B110 H847.181 X-0.391 Y0.390 Z0 G31 P500 X20 Y-12 Z2.25

Figura 49 - Linhas de código G que definem a área e a posição do sensor de altura para a configuração arrefecida por ar

A DeltaIPS foi afinada com a maior atenção às necessidades geométricas, nomeadamente a equidistância entre os três postes verticais assim como a perpendicularidade dos mesmos com a base e topo da impressora. Para tal, fabricou-se calibres e utilizou-se esquadros para satisfazer as respetivas necessidades geométricas e procedeu-se às afinações necessárias. As varetas responsáveis pela sustentação da cabeça de impressão foram medidas com precisão e agrupadas da maneira mais benéfica, ou seja, são agrupadas duas a duas, onde o critério de escolha é as duas varetas com as cotas nominais reais mais próximas uma da outra devem fazer a ligação entre um carro e a cabeça de impressão (num conjunto de seis varetas, agrupamos as duas mais compridas para um carro, as duas mais curtas para outro e as restantes devem fazer a ligação ao terceiro carro). O agrupamento de varetas com dimensões semelhantes permite garantir uma maior perpendicularidade da cabeça de impressão com a base da impressora sendo que eventuais diferenças de comprimento podem ser compensadas através de ajuste eletrónico. Cuidado especial foi também prestado à posição das rótulas magnéticas para garantir que o topo das seis esferas define um plano, garantido que nenhuma das varetas ficará encarregue de unir uma distância mais curta ou maior. Contudo, durante a calibração da impressora, verificou-se que existiam pequenos desvios dimensionais. Recorrendo a um modelo impresso de um esquadro tridimensional, foi possível avaliar a ortogonalidade dos três eixos, assim como o seu comprimento, utilizando para tal um projetor de perfis para a medição de ângulos e um paquímetro digital para a aferição do comprimento impresso (Figura 50 e Figura 54).

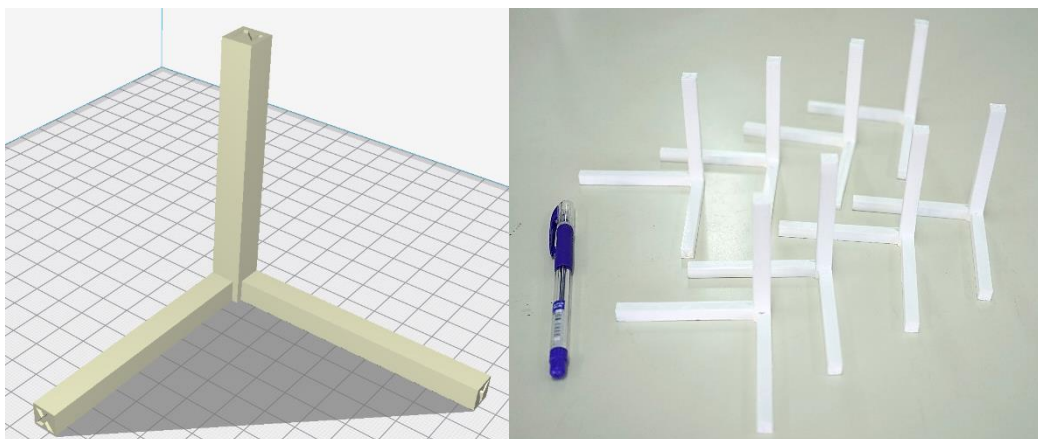


Figura 50 - Diversos esquadros tridimensionais para calibração da impressora

Como o movimento numa impressora delta é realizado através da posição de três motores, não existe uma relação direta entre o movimento de um motor e o movimento ao longo de um eixo, como numa impressora cartesiana. Deste modo, a calibração de uma impressora delta requer uma correção individual em cada motor de modo a que o movimento real ao longo de um eixo corresponda ao movimento especificado. O Duet Wifi permite a compensação digital do fator de escala de um movimento em cada eixo, isto é, ele permite escalar o valor de movimento pedido para que o valor real seja efetivamente o desejado compensando eventuais desalinhamentos que estejam presentes na máquina. Ainda é possível afinar a ortogonalidade dos eixos digitalmente sendo que o computador executa os cálculos necessários para que as impressões possam ocorrer sobre eixos ortogonais, evitando erros geométricos nas peças produzidas. Salienta-se que estas correções requerem um elevado poder de computação principalmente quando utilizadas para correção de geometrias delta a elevadas velocidades de impressão, devido à complexidade e elevado número de cálculos a realizar por unidade de tempo, sendo que a maioria das soluções comercialmente disponíveis não oferecem estas capacidades, principalmente controladores de 8bits.

Para que tais correções sejam efetuadas é necessário realizar iterativamente vários esquadros tridimensionais, até que os valores de dimensão converjam para o valor especificado assim como os ângulos entre os eixos sejam de 90°. Para realizar a compensação do fator de escala deve resolver-se a equação 4.3.

$$X = \frac{Dimensão_{real}}{Dimensão_{medida}} \quad (4.3)$$

Esta informação deve ser fornecida ao controlador - como se apresenta em baixo - onde o valor obtido para cada eixo deve ser colocado em frente à designação do mesmo, representado pela letra minúscula na instrução da Figura 51.

M579 Xxxx Yyyy Zzzz

Figura 51 - Linha de código G para calibração do fator de escala

Para a compensação da ortogonalidade entre eixos, é necessário verificar o ângulo que o eixo X realiza com o Y, o ângulo entre os eixos X e Z e o ângulo entre o eixo Y e Z. Com o valor do ângulo deve-se calcular qual o desvio geométrico na extremidade do esquadro impresso, realizando o cálculo da equação 4.4.

$$X = \cos \alpha \quad (4.4)$$

Onde X representa o desvio geométrico do eixo Y em relação ao eixo X (Figura 52). Deve proceder-se ao mesmo cálculo para o valor Y e Z que representam o desvio entre YZ e XZ, respetivamente.

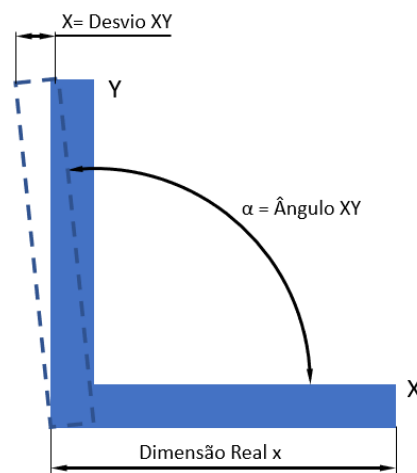


Figura 52 - Parâmetros necessários para a calibração da perpendicularidade dos eixos da impressora.

Com os valores previamente calculados, deve introduzir-se a informação da Figura 53 para que o controlador possa efetuar uma compensação eletrónica dos desvios. O parâmetro S indica o comprimento real do esquadro utilizado para efetuar a medição dos cálculos.

M556 Snn Xxxx Yyyy Zzzz

Figura 53 - Linha de código G para correção da perpendicularidade entre eixos da impressora

Na Figura 54 pode observar-se um projetor de perfis, o equipamento utilizado para efetuar a medição dos ângulos, das espessuras de camada e, utilizando luz refletida, a espessura de cada linha impressa.



Figura 54 - Projetor de perfis utilizado para verificação da perpendicularidade

Por fim, recomenda-se correr o comando G32 para que a máquina execute uma rotina de auto calibração, onde procura, com a informação anteriormente fornecida, perceber se existe desalinhamentos, varetas de dimensões diferentes, e empenos resultantes da montagem. A rotina consiste na medição da altura de uma matriz de pontos sobre a mesa de impressão na qual se calcula o desvio dos pontos em relação ao plano $Z=0$. Com esses dados, o controlador da impressora consegue perceber qual o raio da delta, qual o comprimento equivalente das diversas varetas, qual a cota máxima em Z disponível para impressão, qual a posição dos fins de cursos X, Y e Z equivalentes na impressora delta, assim como o desnível equivalente desses eixos. Este comando responde com os parâmetros que devem ser compilados nas instruções da Figura 55.

M665 R237.472 L477.403 B175 H847.181 X-0.391 Y0.390 Z0 M666 X2.31 Y0 Z-2.31
--

Figura 55 - Dados a compilar após a execução do comando G32

Onde na linha de código M665, R representa o raio da geometria delta; L representa o comprimento equivalente do conjunto de varetas e rótulas; B é o raio considerado seguro para impressão (deve ser dado pelo utilizador da máquina); H representa a altura total disponível para impressão; X, Y e Z representam os empenos das torres da impressora delta. Na linha do código M666, X, Y e Z traduzem a posição dos fins de curso equivalentes na impressora[38].

5. Otimização de parâmetros de impressão

5.1. Propriedades mecânicas

Com este estudo pretende-se otimizar parâmetros de impressão de modo a maximizar a tensão de rotura de peças produzidas por impressão 3D, utilizando o polímero PEEK.

5.2. Planeamento de Experiências

Para proceder a um estudo com resultados válidos e pertinentes, pretende-se aplicar o método de planeamento de experiências, um método universalmente aceite pela comunidade científica. Este método permite analisar as diversas variáveis do processo e, entre elas salientar quais as mais relevantes para o problema em questão utilizando modelos matemáticos, permitindo ainda modelar qual a resposta do processo a qualquer combinação de valores dentro do intervalo previamente estudado.

Pretende-se aplicar este método para determinar quais os parâmetros de impressão 3D (*inputs*) que permitem obter variâncias mais significativas da resistência mecânica (*outputs*). Este método permite ainda estudar a variação de diferentes inputs sem sacrificar a validade dos resultados. Deste modo, é possível conduzir diversos ensaios sem elevar demasiado os custos, tendo presente que o PEEK é um material de custo elevado.

Atendendo aos estudos de Montgomery, D. [39] pretende-se seguir o seguinte procedimento:

1. Reconhecimento e estabelecimento do problema;
2. Escolha dos fatores, níveis e alcance;
3. Seleção das variáveis de resposta;
4. Escolha do design da experiência;
5. Realização da experiência;
6. Análise estatística dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Recorrendo a esta lógica, e estando o problema estabelecido, procura-se estudar a influência dos parâmetros de impressão 3D no comportamento mecânico do PEEK.

Após um estudo inicial onde se procurou afinar a impressora e a geração de código G, assim como averiguar a resposta do comportamento da extrusão em função dos diferentes parâmetros de impressão 3D, selecionou-se, dentro de muitos, a temperatura de extrusão, a temperatura da base de impressão, a velocidade de impressão e a espessura de camada para uma análise mais detalhada.

Atendendo aos recursos disponíveis, a seleção do tipo de experiência adequado foi um fator importante. Sendo que com o aumento dos números fatores e de níveis o número de ensaios cresce imensamente, não esquecendo o número de repetições para que os resultados tenham relevância estatística, optou-se por selecionar os métodos de Taguchi com três níveis por fator para a análise dos resultados. As vantagens da escolha deste método assentam no fato de ser uma ferramenta fácil de aplicar, utilizando um número baixo de ensaios devido às matrizes ortogonais, sendo necessário realizar 27 provetes para a combinação escolhida. Em comparação direta com o método fatorial seriam necessários 81 (3^4) ensaios. Com os métodos de Taguchi é possível perceber qual o nível da importância de cada variável no *output* estudado podendo *a posteriori* realizar-se um estudo mais aprofundado sobre os parâmetros mais relevantes. Em contrapartida, a maior desvantagem deste método é que os resultados são relativos e não especifica qual o valor da combinação de parâmetros que maximiza a resposta. No entanto o nível de significância de cada variável em estudo na resposta é avaliado matematicamente e tem em conta efeitos cruzados entre variáveis. Outra desvantagem característica é que Taguchi não estuda todas as combinações de variáveis, pelo que não pode ser usado quando se procura saber quais as interações entre todos os valores. Uma vez que o método de Taguchi assume que as variáveis fora de controlo permanecem estáveis durante o processo de fabrico, alterações como humidade presente no filamento, velocidade de arrefecimento do provete pós impressão, entre outras, não são contabilizadas nos resultados, pelo que deve procurar-se que sejam controladas. Sumarizando, Taguchi é uma excelente abordagem aquando dos primeiros passos no estudo de novos processos de fabrico.

Com os dados obtidos no estudo preliminar, pôde especificar-se quais as variações máximas de parâmetros que possibilitavam a impressão com sucesso de provetes. Assim foi possível atribuir um valor a cada nível por fator como presente na tabela 6. A temperatura de extrusão é possível variar entre 360°C até 420°C sem que haja variação da dificuldade de impressão do provete. A temperatura da cama de impressão também não é relevante para a dificuldade de impressão, desde que se utilize uma base de impressão de PEI. Contudo, para valores abaixo de 140°C, verifica-se que existem

muitas zonas amorfas nos provetes, características por apresentarem uma cor castanha translúcida ao invés do bege opaco característico da fase semi-crística (figura 55). Sendo o PEEK um polímero de natureza semi-cristalina, a velocidade de arrefecimento desde a temperatura de fusão (ou temperaturas superiores) até à temperatura de transição vítrea, condiciona diretamente a formação de zonas cristalinas. Para arrefecimentos mais lentos, existe mais tempo para que as longas cadeias poliméricas se organizem estruturalmente, condensando-se em zonas de maior densidade molecular. Estas zonas de maior densidade molecular, as zonas semi-cristalinas, conferem ao material melhores características mecânicas devido à maior presença de moléculas por unidade de volume e à organização estrutural sobre uma direção principal. Quando comparadas com zonas amorfas onde, relativamente, existe menor densidade molecular e as cadeias poliméricas não apresentam nenhuma organização preferencial, a resistência mecânica é inferior. É, por isso, relevante procurar promover uma maior percentagem de zonas cristalinas de modo a maximizar as propriedades mecânicas[40][41].

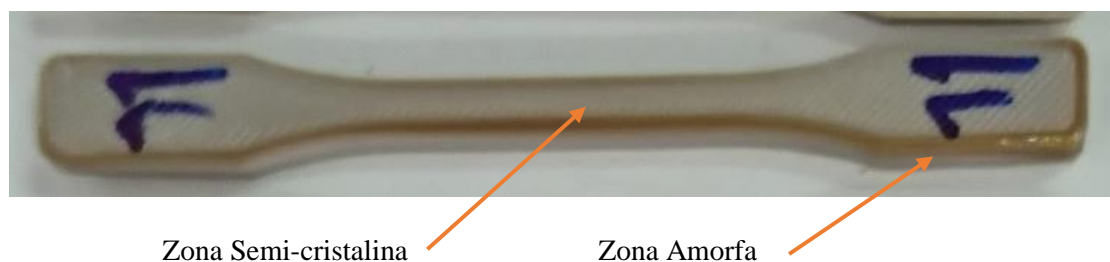


Figura 56 - Zonas amorfas e semi-cristalinas num provete em PEEK

Para velocidades de impressão superiores a 40 mm/s verificou-se que, com a configuração atual da impressora, era impossível de realizar impressões com sucesso pelo que se limitou a velocidade máxima a 30mm/s. Por fim, a espessura de camada entre 0.1 a 0.3mm não representou um obstáculo ao sucesso das impressões preliminares pelo que se fixaram as espessuras de 0.1mm e 0.2mm para o estudo, uma vez que são múltiplos diretos do diâmetro do *nozzle* e são espessuras recorrentemente estudadas para *nozzle* de 0.4mm[32], [42]. Por ultimo, a espessura de 0.25mm representa a aproximação à centésima de polegada e é uma das espessuras recomendadas por uma empresa líder na impressão 3D de PEEK, pelo que se fixou também este valor como um nível. Esta informação encontra-se sumariada na tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros para estudo (fatores) e respectivos níveis

Parâmetros de impressão	Temperatura de extrusão	Temperatura de <i>heatedbed</i>	Velocidade de impressão	Espessura de camada
Nível 1	380°C	160°C	10mm/s	0.1mm
Nível 2	400°C	180°C	20mm/s	0.2mm
Nível 3	420°C	200°C	30mm/s	0.25mm

Salvo exceção a combinações de valores de impressão nos limites mais frios associados a velocidades mais elevadas de impressão, originaram provetes com presença de mais zonas amorfas. Uma possível justificação assenta no modelo de transferência de calor desde o *hotend* até ao polímero, onde velocidade de extrusão elevada com temperaturas baixas reduzem a quantidade de calor por este recebido o que privilegia o aparecimento de zonas amorfas. Deste modo, não se recomenda a impressão com esta combinação de parâmetros.

Para os fatores e respetivos níveis que se pretendem estudar, a matriz ortogonal de Taguchi resultante é apresentada na tabela 7:

Tabela 7: Matriz Taguchi L9

Nº de Ensaio	Temperatura de extrusão	Temperatura de <i>heatedbed</i>	Velocidade	Altura de camada
1	1 (380°C)	1 (160°C)	1 (10mm/s)	1 (0.1mm)
2	1	2 (180°C)	2 (20mm/s)	2 (0.2mm)
3	1	3 (200°C)	3 (30mm/s)	3 (0.25mm)
4	2 (400°C)	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3 (420°C)	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Salienta-se a teoria da aleatoriedade que afirma que, durante a realização de determinada experiência, existem vários fatores externos que pela sua difícil capacidade de controlar ou pelos custos demasiados elevados associados ao seu controlo, são exemplo, a temperatura ambiente, a humidade relativa da sala, a humidade absoluta presente no filamento, pequenas variações de diâmetro ao longo do rolo de filamento, entre outras.

Se o impacto destas variáveis não representar uma influência na resposta do sistema, então as experiências serão sempre aleatórias. Em contrapartida, se o contrário se verifica, então as experiências não serão aleatórias e o impacto destas variáveis terá de ser considerado. Deste modo e na impossibilidade de controlar alguns dos fatores supracitados, a impressão dos provetes será conduzida de forma aleatória assim como os ensaios de tração de modo, numa tentativa de anular a influência destes fatores assegurando que todos os provetes são afetados de igual forma pelos fatores de ruído. Na tabela 8 é apresentada a ordem aleatória para a impressão de provetes, assim como as diferentes combinações de níveis e fatores.

Tabela 8 – Ordem de impressão dos provetes

ORDEM DE IMPRESSÃO	Ensaio	Réplica	Temperatura nozzle (°C)	Temperatura de Heatbed (°C)	Velocidade (mm/s)	Altura de camada (mm)
1	20	3	380	180	20	0,20
2	11	2	380	180	20	0,20
3	16	2	420	160	30	0,20
4	3	1	380	200	30	0,25
5	10	2	380	160	10	0,10
6	7	1	420	160	30	0,20
7	22	3	400	160	20	0,25
8	25	3	420	160	30	0,20
9	24	3	400	200	10	0,20
10	26	3	420	180	10	0,25
11	14	2	400	180	30	0,10
12	1	1	380	160	10	0,10
13	21	3	380	200	30	0,25
14	15	2	400	200	10	0,20
15	5	1	400	180	30	0,10
16	23	3	400	180	30	0,10
17	6	1	400	200	10	0,20
18	8	1	420	180	10	0,25
19	13	2	400	160	20	0,25
20	12	2	380	200	30	0,25
21	27	3	420	200	20	0,10
22	19	3	380	160	10	0,10
23	4	1	400	160	20	0,25
24	2	1	380	180	20	0,20
25	17	2	420	180	10	0,25
26	18	2	420	200	20	0,10
27	9	1	420	200	20	0,10

5.3. Ensaio de Tração Uniaxial

A determinação destas propriedades mecânicas pode ser obtida através de ensaios de tração uniaxial. À data deste estudo não existe norma para testar as propriedades mecânicas através do processo de impressão 3D, pelo que ensaios preliminares em PLA e ABS foram conduzidos de acordo com a norma ISO 527 – *Determination of Tensile Properties of Plastics*[43] – e pela norma ASTM D638 – *Tensile properties of plastics*[44] – que contemplam polímeros produzidos por injeção ou por extrusão. Várias geometrias de provetes foram impressas, em ABS e PLA, para verificar quais eram as passíveis de ser utilizadas e quais as dimensões mínimas para o comprimento

(figura 56). Atendendo à norma, serão impressos provetes com preenchimento total, ou seja, sólidos para testar as propriedades mecânicas.



Figura 57 - Diferentes geometrias de provetes para pré-ensaios

Uma vez que o PEEK é um polímero com um preço muito elevado e a execução de cada provete é demorada devido à necessidade de utilizar baixas velocidades de impressão, optou-se por utilizar provetes tipo 1BA com o menor comprimento possível, pois são os provetes com menor volume – o que possibilita um maior número de ensaios, com a mesma quantidade de material. As arestas vivas do provete, sugeridas pela norma, foram boleadas com o objetivo de reduzir o empeno do provete durante a impressão. Em baixo é apresentado um desenho técnico (Figura 58) com as dimensões gerais do provete. Para mais detalhes em relação ao desenho dos provetes deverá ser consultada a norma ISO 527[43].

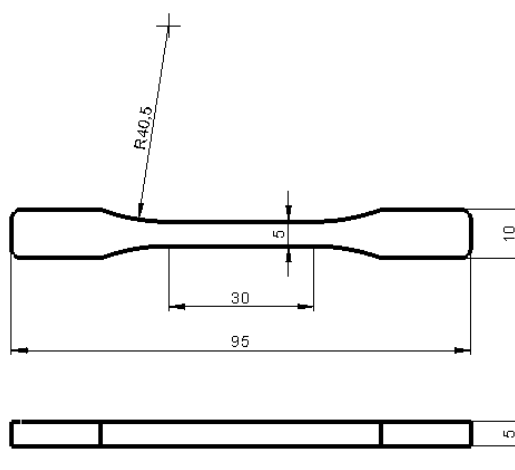


Figura 58 -Provete ISO527 1BA com comprimento de 95mm

De acordo com a ISO527[43], para cada ensaio que se pretende efetuar devem ser produzidos um mínimo de cinco provetes, de forma a que o resultado tenha relevância

estatística e permitindo compensar eventuais *outliers*. No entanto apenas foram produzidos três provetes pelos custos envolvidos já mencionados e pelo tempo limitado. O ensaio será conduzido a uma velocidade de 1mm/minuto de acordo com a recomendação da norma. A taxa de amostragem será de 10 amostras por segundo e utilizou-se o deslocamento do travessão da máquina como unidade de extensão, uma vez que o IPS não dispõe de um *clip gauge* para esta dimensão.

Atendendo ao objetivo secundário – verificação dimensional das peças obtidas por impressão 3D na impressora DeltaIPS – selecionou-se aleatoriamente uma amostra de provetes com recurso a um gerador de números aleatório e conduziu-se uma verificação, no laboratório de qualidade do Instituto Politécnico de Setúbal, das dimensões dos provetes, para garantir que a reprodução das peças corresponde às dimensões normalizadas. Ainda neste laboratório pretende-se verificar em todos os provetes de ensaio que as dimensões da zona de ensaio, a zona de menor secção, se encontra dentro da tolerância atribuído pela norma. Para efetuar estas medições pretende-se utilizar os micrómetros disponíveis neste laboratório, assim como o projetor de perfis – que conduz a resultados mais precisos. Provetes que não tenham as dimensões pretendidas serão eliminados e novos provetes com as mesmas características serão reproduzidos. Por fim, é recomendado que esta verificação dimensional seja efetuada à temperatura, humidade e pressão a que se realizará o ensaio pelo que se terá em consideração a climatização das salas, caso seja necessário. Na Figura 59 pode observar-se todos os provetes prontos para o ensaio de tração.



Figura 59 - Provetes impressos em PEEK

Após a aprovação de todos os provetes, estes serão testados individualmente numa máquina de tração uniaxial disponível no Instituto Politécnico de Setúbal. O modelo em questão trata-se de uma máquina/modelo da marca Impact Test E-Series/TS 300 com o número de série 380, equipada com uma célula de carga de $\pm 50\text{kN}$ (Figura 60). Deste modo, pôde obter-se as propriedades mecânicas de cada combinação de parâmetros. Pode observar-se na figura 58 uma fotografia de um provete em PEEK pronto para executar um ensaio. Prevê-se, que à semelhança do material produzido por extrusão ou injeção plástica, exista uma zona de elasticidade e uma zona onde existe plastificação, facilmente distinguíveis. No entanto, estudos prévios demonstram que existe uma redução entre trinta a cinquenta por cento da tensão limite de cedência e cerca de vinte a trinta por cento de redução na elasticidade do material em peças produzidas por FFF, face à injeção plástica ou extrusão [31][32]. Porém, após a otimização de parâmetros, um estudo mais recente relata atingir cerca de 80% da tensão de cedência de provetes obtidos por injeção ou extrusão plástica, o que corresponde a cerca de 75 a 80 MPa[42]. Uma vez mais, os ensaios serão conduzidos de forma aleatória. A ordem sorteada para a tração dos provetes é apresentada na tabela 9.



Figura 60 - Máquina utilizada para ensaio de tração e montagem de um provete

Tabela 9 – Ordem de tração dos provetes

ORDEM DE TRAÇÃO	Ensaio	Réplica	Temperatura de nozzle (°c)	Temperatura de <i>heatedbed</i> (°c)	Velocidade (mm/s)	Altura de camada (mm)
1	14	2	400	180	30	0,10
2	18	2	420	200	20	0,10
3	21	3	380	200	30	0,25
4	12	2	380	200	30	0,25
5	10	2	380	160	10	0,10
6	17	2	420	180	10	0,25
7	2	1	380	180	20	0,20
8	16	2	420	160	30	0,20
9	5	1	400	180	30	0,10
10	9	1	420	200	20	0,10
11	15	2	400	200	10	0,20
12	6	1	400	200	10	0,20
13	27	3	420	200	20	0,10
14	23	3	400	180	30	0,10
15	8	1	420	180	10	0,25
16	4	1	400	160	20	0,25
17	26	3	420	180	10	0,25
18	1	1	380	160	10	0,10
19	24	3	400	200	10	0,20
20	20	3	380	180	20	0,20
21	7	1	420	160	30	0,20
22	11	2	380	180	20	0,20
23	25	3	420	160	30	0,20
24	13	2	400	160	20	0,25
25	19	3	380	160	10	0,10
26	3	1	380	200	30	0,25
27	22	3	400	160	20	0,25

6. Resultados experimentais

6.1. Realização dos ensaios e aquisição de dados

Conforme descrito anteriormente, os ensaios foram conduzidos de forma aleatória ao longo de dois dias seguidos no laboratório de Mecânica de Materiais, na Escola Superior de Tecnologia de Setúbal do Instituto Politécnico de Setúbal. A velocidade do ensaio utilizada foi de 1 milímetro por minuto, conforme sugerido pela norma.

Para analisar os resultados obtidos é primeiro necessário proceder à conversão de dados, uma vez que a máquina de ensaios de tração universal apenas nos dá o deslocamento do travessão, assim como a força registada pela célula de carga. Para tal, o deslocamento pode ser convertido em extensão nominal pela seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6.1)$$

Onde a variação de L , ΔL , representa o deslocamento do travessão e L representa o comprimento inicial do provete antes de ser efetuado o ensaio.

Por sua vez, o cálculo da tensão é bastante direto, aplicando a seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6.2)$$

Onde se lê que a tensão é dada pela força F , registada pela célula de carga, sobre a área da secção do provete. As dimensões da secção do provete são medidas previamente com recurso a um paquímetro digital, de resolução ± 0.01 mm, e multiplicadas para se obter o valor da área A . Com estes valores é possível transformar os dados retirados diretamente da máquina de ensaios (Figura 61) e convertê-los numa curva de tensão-deslocamento para melhor interpretação dos resultados. Na tabela 10 são apresentadas as dimensões da secção de ensaio assim como a sua área.

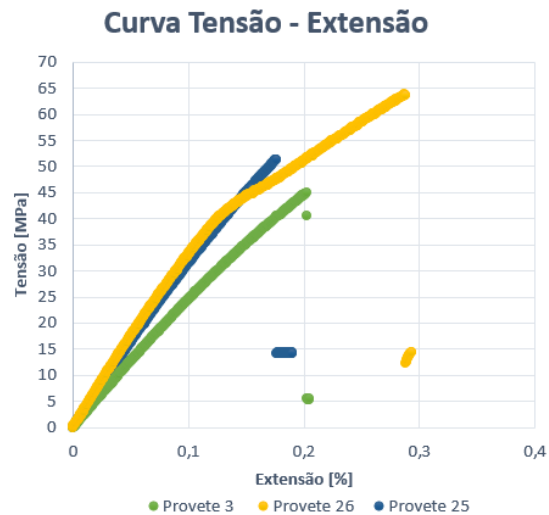


Figura 61 – Resultados de diferentes provetes ensaiados

**Tabela 10 – Dimensões e área da secção de ensaio dos
provetes impressos na Delta IPS**

ENSAIO	RÉPLICA	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA DA SECÇÃO DE ENSAIO (mm ²)
1	1	5,01	5,09	25,50
2	1	5,39	5,05	27,22
3	1	3,65	5,26	19,12
4	1	5,05	4,73	23,89
5	1	4,60	5,14	23,64
6	1	4,56	5,16	23,53
7	1	5,22	4,79	25,01
8	1	4,79	5,15	24,67
9	1	3,40	5,15	17,51
10	2	4,10	4,80	19,68
11	2	4,55	4,76	21,66
12	2	4,82	4,78	23,40
13	2	5,10	4,99	25,45
14	2	5,58	4,48	25,00
15	2	4,70	4,69	22,04
16	2	4,49	4,95	22,23
17	2	4,90	4,89	23,96
18	2	4,83	4,99	24,10
19	3	4,45	5,10	22,70
20	3	4,64	5,14	23,85
21	3	4,96	5,05	25,05
22	3	4,98	5,17	25,75
23	3	4,84	5,04	24,39
24	3	4,71	4,84	22,80
25	3	3,21	5,15	16,53
26	3	4,63	4,82	22,32
27	3	4,95	4,89	24,21

6.2. Resultados obtidos com a Delta IPS

Após realizar os ensaios de tração, foi possível obter os resultados compilados na tabela 11.

Tabela 11 – Resultados experimentais provetes realizados na Delta IPS

Nº	Temperatura de <i>nozzle</i> (°c)	Temperatura de <i>heatedbed</i> (°c)	Velocidade (mm/s)	Altura de camada (mm)	Tensão rotura réplica 1 (Mpa)	Tensão rotura réplica 2 (Mpa)	Tensão rotura réplica 3 (Mpa)
1	380	160	10	0,10	46,70	38,03	41,17
2	380	180	20	0,20	48,51	61,61	45,16
3	380	200	30	0,25	39,72	56,99	58,39
4	400	160	20	0,25	42,55	25,59	40,88
5	400	180	30	0,10	59,60	30,86	41,98
6	400	200	10	0,20	49,82	25,62	44,43
7	420	160	30	0,20	18,31	37,65	37,09
8	420	180	10	0,25	46,11	54,75	56,97
9	420	200	20	0,10	34,60	51,019	51,76

De seguida deve proceder-se a uma análise das respostas médias à razão sinal-ruído e ao declive da reta. A análise é feita do ponto de vista “maior é melhor” – que calcula o nível de S/N de acordo com a equação 6.3.

$$(S/N) = -10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right) dB \quad (6.3)$$

A tabela 12 permite identificar os melhores níveis dos fatores para a razão sinal-ruído, selecionando os níveis com a maior razão sinal-ruído. A linha, Posição, permite identificar os fatores mais significativos. O gráfico da Figura 62 pretende ilustrar os dados da tabela 12, oferecendo uma perspetiva visual da relevância de cada fator, assim como a importância de cada nível.

Tabela 12 – Respostas S/N médias para provetes da Delta IPS

Nível	Temperatura de <i>nozzle</i>	Temperatura de <i>heatedbed</i>	Velocidade	Altura de camada
1	33,43	30,39	32,53	32,37
2	31,13	33,45	32,43	31,1
3	31,79	32,50	31,39	32,89
Efeito	2,30	3,06	1,14	1,79
Posição	2	1	4	3

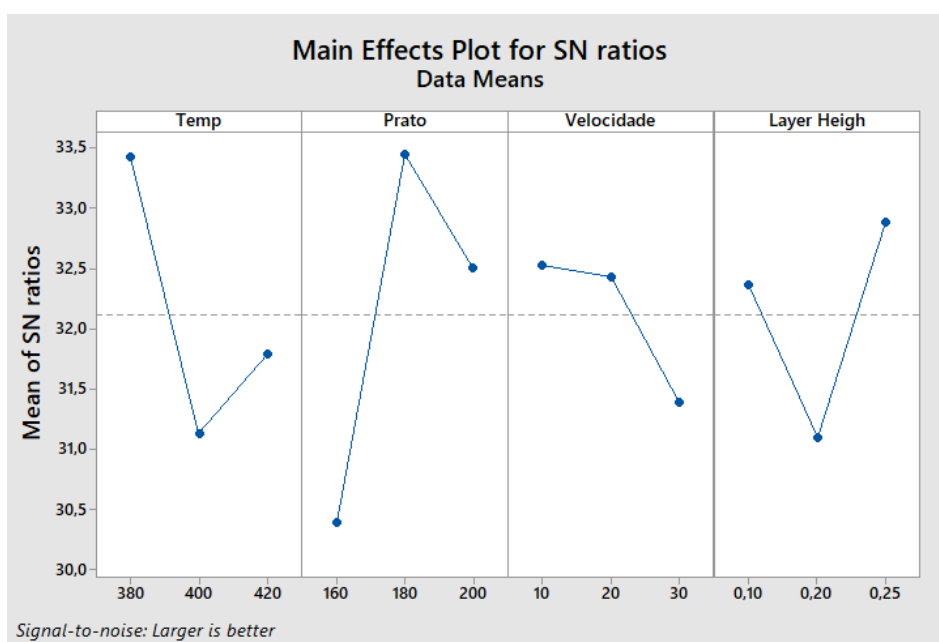


Figura 62- Fatores de controlo sobre razão Sinal - Ruído

Da análise da tabela 12 e do gráfico da Figura 62 é possível perceber que o fator mais relevante é a temperatura do prato seguida da temperatura de extrusão. Relativamente, a velocidade e a altura de camada são os fatores que apresentam menos relevância. Estas conclusões podem ser retiradas facilmente ao observar a Figura 62 e analisar a variação entre o valor máximo e mínimo de S/N. Variações muito elevadas traduzem maior importância do respetivo fator pois é a variação do mesmo que mais afeta os resultados finais. Um valor de amplitude reduzido entre o máximo e mínimo do S/N traduz uma variação pouco significativa, o que fisicamente se traduz na pouca relevância do fator. Assim, valores próximos da linha média de S/N traduzem pouca significância para a análise em questão, enquanto grandes disparidades da média traduzem maiores influências desse fator. Em conclusão, os níveis que maximizam a resposta são a temperatura de 180°C e de 380°C para a temperatura de *Heatedbed* e do extrusor, respetivamente. Da análise da velocidade e da *Layer Heigh* obtêm-se os mesmos

resultados do que em [45], onde se conclui que velocidades de impressão mais lentas garantem melhores valores de tensão de rotura enquanto o comportamento da altura de camada verifica um comportamento paraboloide com concavidade para cima, onde, o valor do nível médio 0.2mm, representa o menor valor de tensão de rotura. Por último, as camadas mais grossas – 0.25mm de espessura – garantem melhores propriedades mecânicas.

Paralelamente, construiu-se um gráfico a partir dos valores da tabela 13, onde é possível identificar rapidamente os melhores níveis dos fatores (Figura 63). A tabela e o gráfico mostram os mesmos resultados com base na análise das respostas médias. Analisando os resultados, construiu-se a tabela 14 onde se apresentam os melhores níveis dos fatores a experiência realizada

Tabela 13 – Respostas β médias para provetes da Delta IPS

FATOR/NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	TEMPERATURA DE HEATEDBED	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
1	48.48	36.44	44.85	43.97
2	40.15	49.51	44.63	40.91
3	43.14	45.82	42.29	46.88
Efeito	8.33	13.06	2.56	5.97
Posição	2	1	4	3

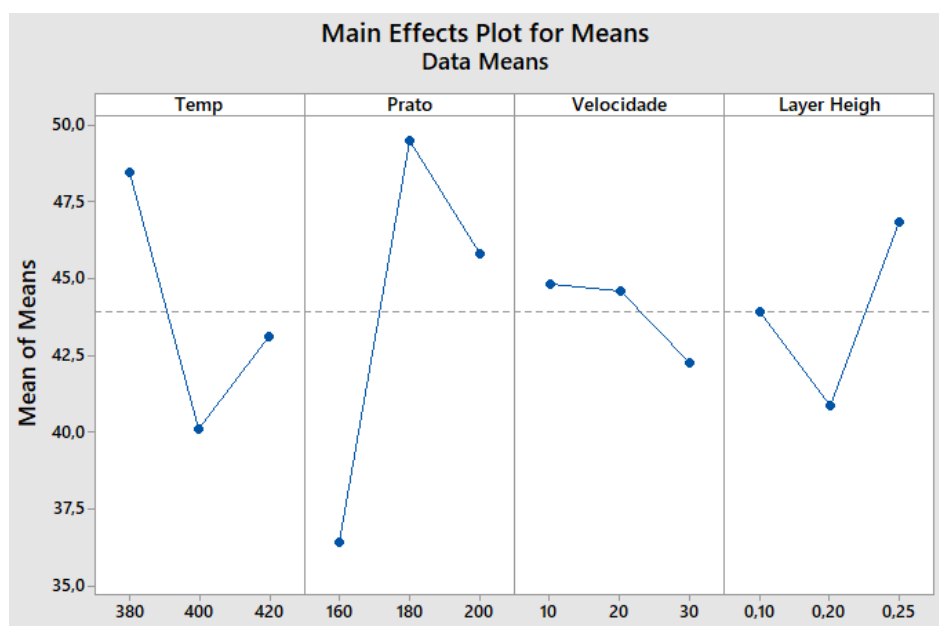


Figura 63 - Fatores de controlo, análise das respostas médias

**Tabela 14 – Combinação de níveis que maximiza a tensão de ruptura
para provetes da Delta IPS**

<i>FATOR/NÍVEL</i>	<i>TEMPERATURA DE NOZZLE</i>	<i>TEMPERATURA DE HEATEDBED</i>	<i>VELOCIDADE</i>	<i>ALTURA DE CAMADA</i>
Nível	1	2	1	3
Valor do Nível	380°C	180°C	10mm/s	0.25mm

Para este caso de análise específico, visto que todas as combinações de valores foram possíveis de imprimir, a análise de resultados pelo índice S/N ou pela média de valores permite retirar as mesmas conclusões, no entanto a análise por S/N é sempre mais correta que a análise pelas respostas médias.

Na tabela 11 podemos afirmar que existem pelo menos três valores considerados *outliers*. Se decidirmos retirar estes valores prejudicando o número de réplicas para cada experiência pode-se realizar uma análise de Taguchi e perceber se estes valores contribuem para uma alteração das conclusões retiradas anteriormente. Os valores em questão são: 25,59MPa da entrada experiência 4, réplica 2; 25,62MPa da experiência 6, réplica 2; e 18,31MPa da experiência 7, réplica 1. Ao retirar os valores considerados e realizando a mesma análise, pode obter-se os valores da tabela 15 e da Figura 64.

**Tabela 15 – Respostas S/N médias para provetes da Delta IPS não
considerando outliers**

Nível	Temperatura de <i>nozzle</i>	Temperatura de <i>heatedbed</i>	Velocidade	Altura de camada
1	33,43	33,25	33,95	32,37
2	33,78	33,45	33,66	34,15
3	33,42	33,93	33,02	34,11
Efeito	0.35	0.68	0.94	1,78
Posição	4	3	2	1

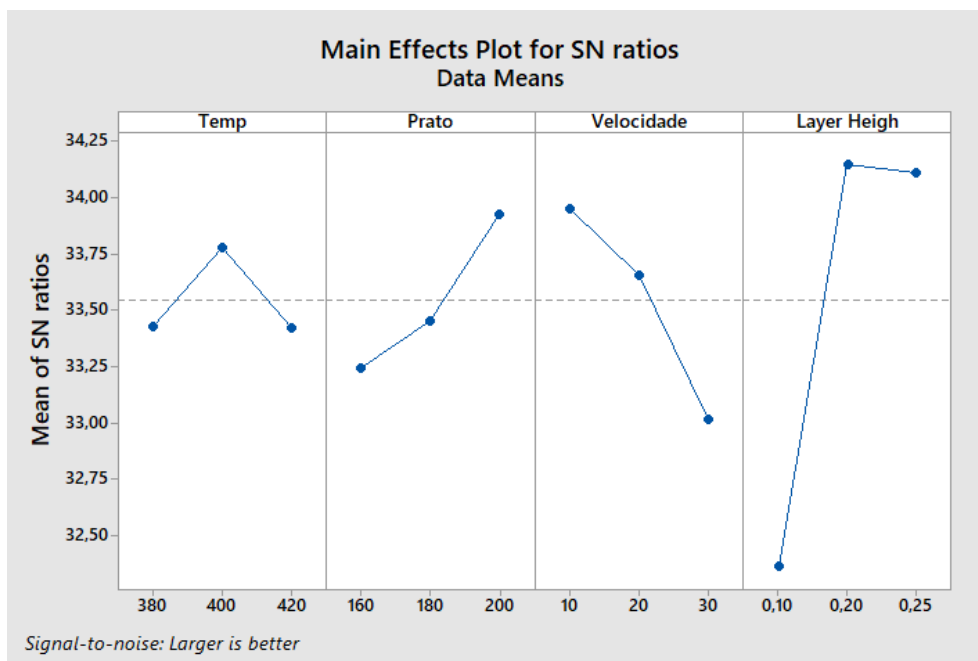


Figura 64 - Fatores de controlo sobre razão Sinal - Ruído para resultados não considerando outliers

Com esta análise, a importância de cada fator sofre alterações significativas face à análise anterior. Desta vez, o fator mais importante revela ser a altura de camada, nomeadamente a altura de 0.2mm. Logo de seguida temos a velocidade como o parâmetro mais influente, mantendo a filosofia de menores velocidades melhor, a temperatura do prato, estabelece-se como o terceiro fator mais importante, sendo que desta vez a tendência é quanto mais quente melhores os resultados. Por fim, a temperatura do *nozzle* revela-se o fator menos importante, sendo que o melhor nível corresponde à temperatura de 400°C, não se revelando grande diferença entre os níveis 1 e 3. A tabela 16 sumariza as conclusões retiradas.

Tabela 16 – Combinação de níveis que maximiza a tensão de rotura desprezando outliers

FATOR/NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	TEMPERATURA DE HEATEDBED	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
Nível	4	3	2	1
Valor do Nível	400°C	200°C	10mm/s	0.20mm

Por fim, sugere-se analisar os resultados obtidos com uma política de retirar o valor mais baixo, admitindo que este representa algum defeito no provete e que, portanto, o resultado obtido não representa o comportamento de um provete equivalente sem

defeitos. Deste modo, da tabela 11 retiram-se, a cada experiência, o menor valor obtido. Desta maneira, apresentam-se os resultados na tabela 17 e Figura 65.

Tabela 17 – Respostas S/N médias para provetes da Delta IPS retirando os menores valores

Nível	Temperatura de <i>nozzle</i>	Temperatura de <i>heatedbed</i>	Velocidade	Altura de camada
1	35,98	33,98	35,48	35,34
2	34,94	36,19	35,51	34,93
3	35,30	36,05	35,22	35,95
Efeito	1,04	2,21	0,29	1,02
Posição	2	1	4	3

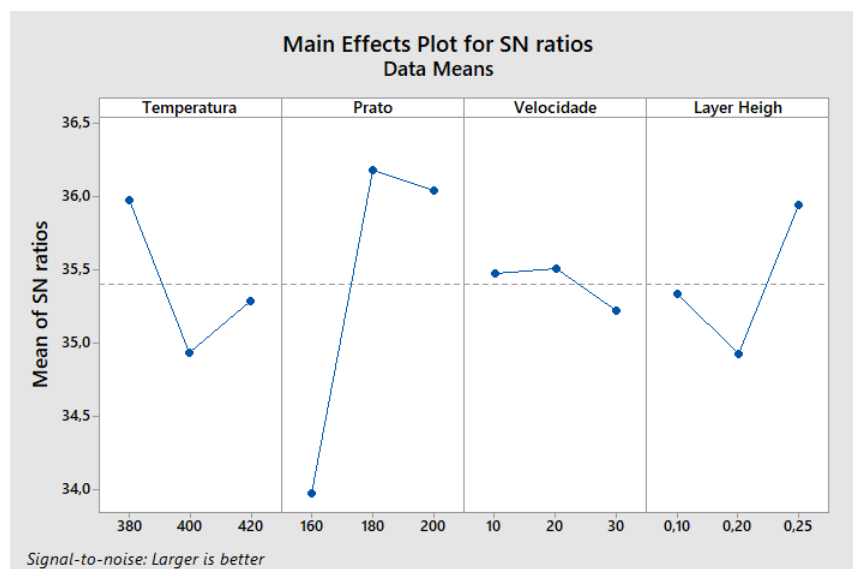


Figura 65 - Fatores de controlo sobre razão Sinal – Ruído

Com esta análise podemos obter as mesmas conclusões em termos de importância de fatores em relação aos valores originais, sendo que o nível da velocidade de impressão que maximiza os resultados é agora o valor de 20mm/s, mas apenas por um valor marginal. A velocidade de impressão representa agora praticamente nenhuma relevância, uma vez que quase todos os pontos se encontram sobre a linha média de S/N. A tabela 18 apresenta a combinação de fatores e respetivos níveis que maximizam a tensão de rotura, analisando os dados e retirando o menor valor obtido.

**Tabela 18 – Combinação de níveis que maximiza a tensão de rotura
retirando os valores menores**

FATOR/NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	TEMPERATURA DE HEATEDBED	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
Nível	1	2	2	3
Valor do Nível	380°C	180°C	20mm/s	0.25mm

6.3. Resultados obtidos com a Creatbot F430

Durante a realização desta dissertação, o laboratório para o desenvolvimento de produto (Lab2Prod) do Instituto Superior Técnico adquiriu uma impressora, comercialmente disponível, com capacidade de impressão de PEEK, nomeadamente, a impressora F430 da marca *Creatbot*. As suas especificações, entre outras, incluem um *hotend* com capacidade para operar até 420°C, uma cama quente com uma temperatura máxima de 120°C e uma câmara quente com capacidade máxima de 70°C. Em termos comparativos, a DeltaIPS, após as alterações efetuadas, ultrapassa todos estes valores pelo que tecnologicamente, mesmo quando comparada com outros modelos comercialmente disponíveis, rivaliza com os requisitos técnicos que o mercado, em geral, oferece.

Para efetuar uma experiência de controlo procedeu-se à elaboração da mesma experiência, sendo que, como a temperatura do prato não ultrapassa os 120°C, decidiu-se retirar este fator da análise de Taguchi, fixando-o para todos os ensaios como 120°C. Os restantes fatores fizeram-se variar dentro dos mesmos valores especificados anteriormente. Dada a reduzida janela de tempo disponível para efetuar as impressões (a impressora apenas chegou ao laboratório durante o mês de Agosto), não foi possível realizar mais do que um provete para cada combinação de valores, pelo que se salienta que os resultados têm pouca relevância estatística, visto que não se realizam operações de análise sobre várias réplicas. A tabela 19 apresenta uma matriz de Taguchi L9 com os respetivos valores de cada nível para cada fator.

Tabela 19: Matriz Taguchi L9 para Ensaios na Creatbot

<i>Nº DE ENSAIO</i>	<i>TEMPERATURA DE EXTRUSÃO</i>	<i>VELOCIDADE</i>	<i>ALTURA DE CAMADA</i>
1	1 (380°C)	1 (10mm/s)	1 (0.1mm)
2	1	2 (20mm/s)	2 (0.2mm)
3	1	3 (30mm/s)	3 (0.25mm)
4	2 (400°C)	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3 (420°C)	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

À semelhança do procedimento anterior, as impressões na Creatbot foram conduzidas aleatoriamente. Após as impressões, a medição das dimensões da secção de ensaio foi realizada com o mesmo aparelho utilizado para os provetes impressos na DeltaIPS sobre as mesmas condições. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 – Dimensões e área da secção de ensaio dos provetes impressos na Creatbot

<i>ENSAIO</i>	<i>PROFUNDIDADE (mm)</i>	<i>LARGURA (mm)</i>	<i>ÁREA DA SECÇÃO DE ENSAIO (mm²)</i>
1	4,25	5,12	21,76
2	5,06	5,05	25,53
3	4,41	5,12	22,58
4	5,25	4,9	26,20
5	4,86	5,19	25,22
6	4,01	5,01	20,29
7	5,16	5,12	26,42
8	4,37	5,16	22,55
9	4,96	5,10	25,30

Uma vez mais, os ensaios de tração foram realizados de forma aleatória seguindo o mesmo procedimento anteriormente explicado para os provetes da DeltaIPS. Os resultados dos ensaios de tração são apresentados na tabela 21.

Tabela 21 – Resultados experimentais provetes realizados na Creatbot

Nº	TEMPERATURA DE NOZZLE (°C)	VELOCIDADE (mm/s)	ALTURA DE CAMADA (mm)	TENSÃO ROTURA (MPa)
1	380	10	0,10	56,72
2	380	20	0,20	57,30
3	380	30	0,25	46,19
4	400	20	0,25	49,62
5	400	30	0,10	47,20
6	400	10	0,20	51,66
7	420	30	0,20	36,88
8	420	10	0,25	44,67
9	420	20	0,10	52,47

Aplicando a mesma análise de Taguchi que se realizou para os provetes impressos na DeltaIPS, pode obter-se os seguintes resultados, apresentados na tabela 22 e Figura 66, com base na análise Sinal-Ruído.

Tabela 22 – Respostas S/N médias para provetes da Creatbot

NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
1	34,51	33,44	34,11
2	33,88	33,88	34,49
3	32,91	33,98	32,70
Efeito	1,60	0,54	1,79
Posição	2	3	1

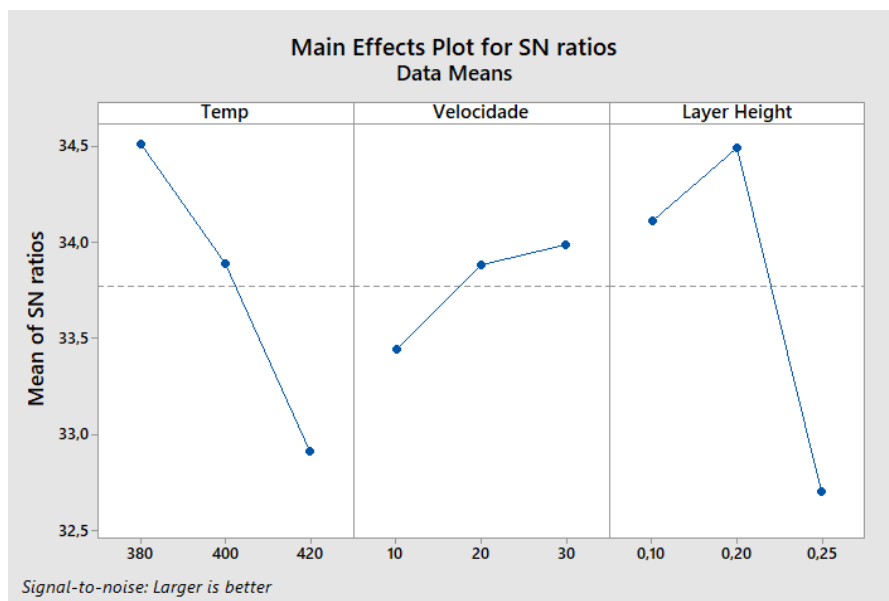


Figura 66 - Fatores de controle sobre razão Sinal – Ruído para provetes da Creatbot

Da análise da tabela e do gráfico da Figura 66 pode concluir-se que, embora não haja grande diferenciação entre os fatores temperatura do *nozzle* e altura de camada, a segunda é ligeiramente mais importante. Em ambos se verifica uma grande amplitude entre o valor máximo e mínimo, o que traduz a importância relativa destes fatores. A velocidade é o fator que menos influencia a resistência do material. Tal como se pode observar, a amplitude do índice S/N é relativamente mais pequena. A maximização dos valores de tensão de rotura ocorre quando se combinam os níveis apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Combinação de níveis que maximiza a tensão de rotura

FATOR/NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
Nível	1	3	2
Valor do Nível	380°C	30mm/s	0.20mm

6.4. Apreciação crítica dos resultados

Analisando fator a fator (tabela 24), começando pela temperatura do *nozzle*, pode-se perceber que para todas as análises, temperaturas mais baixas maximizam os resultados. Embora estes resultados sejam contraditórios com a literatura [32][45][46][47], onde em alguns estudos utilizam gamas ainda mais baixas de temperatura (principalmente nos estudos mais antigos), tal fato pode resultar do

filamento utilizado. Ao imprimir a temperaturas muito elevadas, embora se aumente a fluidez do polímero, podemos estar a fornecer condições para que ocorra degradação das cadeias poliméricas, o que tenderá a diminuir a resistência mecânica. Por vezes, os fabricantes de filamentos, introduzem outros componentes nos filamentos alterando ligeiramente o grau de pureza e as propriedades dos mesmos. Salienta-se que apenas recentemente a 3D4 Makers, o fornecedor do PEEK utilizado neste estudo, lançou para o mercado um novo filamento de PEEK que publicita como mais fácil de imprimir que o originalmente lançado. Ao consultar a ficha técnica, pode observar-se que as propriedades mecânicas não são as mesmas do filamento original, o que demonstra que existe alteração da mistura química utilizada[48].

Tabela 24 – Sumário dos níveis que maximizam a tensão de rotura

FATOR/NÍVEL	TEMPERATURA DE NOZZLE	TEMPERATURA DE HEATEDBED	VELOCIDADE	ALTURA DE CAMADA
Delta IPS	380°C	180°C	10mm/s	0.25mm
Delta IPS s/ Outliers	400°C	200°C	10mm/s	0.20mm
Delta IPS s/ menor valor	380°C	180°C	20mm/s	0.25mm
CreatBot	380°C	120°C	30mm/s	0.20mm

A temperatura da mesa de impressão tende a maximizar os resultados quando se utiliza uma temperatura média. Se desprezarmos os *outliers*, valores mais quentes beneficiam os resultados. Independentemente do nível, este é o fator mais importante para a construção de peças resistentes. Tal facto pode-se justificar pela condução de calor para a peça, especialmente para os provetes que têm uma espessura bastante reduzida – proporciona a cristalização do polímero, o que, como explicado anteriormente, conduz a melhores valores de resistência mecânica. Ainda em fase experimental optou-se por imprimir um provete com a cama quente à temperatura de transição vítrea do PEEK (143°C), o que resultou num provete quase totalmente amorfo. Esta observação fundamenta que o calor da mesa poderá produzir um fator determinante no arrefecimento da peça e, portanto, terá impacto na resistência mecânica. Ainda, para os provetes produzidos na Creatbot, dado que tanto a cama como a câmara apenas permitem temperaturas mais reduzidas, 120°C e 70°C respetivamente, verificou-se que apresentavam perímetros mais amorfos que os produzidos na Delta IPS, facto que poderá justificar a importância da temperatura da cama neste estudo.

O parâmetro velocidade é o parâmetro menos linear, uma vez que para máquinas distintas os resultados são muito diferentes. Tal poderá prender-se com a geometria e desenho do mecanismo extrusor ou com a capacidade de transferência de calor do extrusor para o material. Os resultados para a Delta IPS vão ao encontro de [45], onde os autores concluíram que velocidades mais baixas eram melhores do ponto de vista mecânico. Para a Creatbot, realça-se que apenas se produziu um provete para cada experiência o que poderá justificar a discrepância nos resultados.

Por fim camadas mais finas, independentemente da máquina utilizada são as camadas que minimizam o valor da tensão de rotura. Tal facto poderá prender-se com a pequena quantidade de material depositado que produzirá mais defeitos na estrutura interna do provete. Uma análise ao microscópio de varrimento poderá ser útil para testar esta hipótese. Uma vez mais, este parâmetro está de acordo com o estudo [45], onde os autores verificaram também que as camadas mais grossas eram aquelas que maximizavam a tensão de rotura, pelo menos para *nozzles* com 0.4mm de diâmetro. Para outros valores de diâmetro, encontram-se outros resultados diferentes [45].

7. Conclusão

As alterações à Delta IPS, foram mais profundas e demoradas do que inicialmente se idealizava. No entanto, verificou-se que foram alterações pertinentes e necessárias, de modo a satisfazer os requisitos técnicos necessários à impressão de polímeros de alta temperatura. Verifica-se que, para trabalhos futuros, uma câmara quente com capacidade de atingir maiores temperaturas poderá ser benéfica para a impressão destes polímeros mais exigentes, em especial para PEI, onde a temperatura de transição vítrea é de 217°C. Infelizmente, para este projeto o material utilizado na DeltaIPS estava limitado a uma temperatura de serviço de 90°C. Contudo, a solução implementada, dados os constrangimentos de projeto e as dificuldades de adaptar uma solução à configuração adotada aquando do projeto inicial, possibilitou o aquecimento da câmara, a estabilização da temperatura e a homogeneidade da mesma ao longo da câmara.

A introdução de um extrusor e *hotend* arrefecidos a água requereu a fabricação de diferentes peças, o que exigiu a utilização de máquinas ferramenta controladas por CNC, o que, por sua vez, necessitou do desenvolvimento de programas realizados em CAM. Após ultrapassadas estas dificuldades, tornou-se possível a impressão de PEEK, na Delta IPS, com relativo sucesso. Os sistemas de controlo da câmara, do arrefecimento a água e da adaptação da nova cabeça de impressão exigiram o projeto de circuitos eletrónicos e a utilização de conhecimentos de teoria de sistemas e controlo. Pelos motivos salientados anteriormente, este trabalho revelou-se mais multidisciplinar do que inicialmente se pensava. A tabela 25, sumariza as especificações técnicas iniciais e as especificações finais da Delta IPS.

Pelo método de planeamento de experiências, a otimização de parâmetros de impressão revelou-se de importância fundamental para perceber quais os parâmetros mais influentes e qual a melhor combinação. Verificou-se que existe possibilidade de maior otimização, pelo que um estudo mais aprofundado é sugerido como trabalho futuro. Contudo, conclusões prévias podem ser retiradas tais como temperaturas mais baixas de extrusão maximizam a tensão de rotura, assim como espessuras de camadas mais grossas. Uma vez que as metodologias de Taguchi apenas permitem a otimização de parâmetros para os valores estabelecidos nos níveis dos fatores – ou seja, é um método discreto – sugere-se a repetição ou o aprofundamento do estudo, com recurso a uma técnica considerada contínua, como a metodologia de superfície de resposta. Esta técnica permite a modelação matemática da resposta num intervalo contínuo estabelecido pelos níveis dos fatores estudados, otimizando os parâmetros dentro do

intervalo estabelecido ao invés dos valores estabelecidos para os níveis. Para tal esta metodologia requer a impressão de um maior número de provetes, quando comparada com Taguchi – o que para o tempo disponível se revelou impossível de realizar.

Tabela 25 – Principais características da Delta IPS antes e depois do projeto

Característica	Delta IPS Projeto original	Delta IPS Projeto final
Temperatura máxima de extrusão	280°C (30W)	450°C (65W)
Temperatura da cama quente	180°C	200°C
Temperatura de ambiente de impressão	Temperatura ambiente	Até 80°C
Tipo de arrefecimento do extrusor	Ventilação forçada	Arrefecimento a água
Material do bloco de aquecimento	Alumínio	Cobre
Material do <i>HeatBreak</i>	Aço inoxidável	Titânio
Mecanismo de alimentação	Bowden	Direto
<i>Effector</i>	Alumínio	Fibra de vidro
Polímeros imprimíveis	PLA, ABS, PVA, HIPS, PET e Nylon	PLA, ABS, PVA, HIPS, PET, Nylon, TPU, TPE, PC, PEEK e PEI

7.1. Proposta de trabalhos futuros

Como os resultados deste estudo ainda poderão ser otimizados, sugere-se a experimentação de mais parâmetros de impressão 3D com vista a maximizar a resposta da tensão de rotura. Uma vez otimizada, sugere-se que se imprimam provetes de maiores dimensões, que permitam a análise da elasticidade do material, algo que pela geometria destes provetes não era recomendado pela norma.

Alguns fabricantes de filamento sugerem um pós-processamento das peças impressas em PEEK que consiste numa têmpera do polímero com o intuito de reduzir as tensões acumuladas durante o processo de impressão, assim como promover uma maior adesão entre camadas. O processo de têmpera, quando conduzido a temperatura

acima da temperatura de transição vítrea, promoverá a nucleação da fase semi-cristalina do PEEK, pelo que um eventual acréscimo de resistência mecânica é esperado[25], [41].

Devido ao elevado incremento térmico que tem de se proporcionar ao filamento para que este funda, e dado que o canal reservado para que esta transferência de calor ocorra é de dimensão reduzida, poderá ser conduzido um estudo que procure analisar se um *hotend* com uma maior zona para a transferência de calor (*pool area*), como os *hotend* dedicados à impressão com altas taxas de deposição de material, produz melhores resultados na impressão de PEEK – tanto em termos de resistência mecânica como de rigor dimensional e acabamento superficial.

7.2. Nota final

As tecnologias FFF estão em crescente utilização no mundo da manufatura. Dentro desta família, a impressão 3D de polímeros tem um papel determinante na engenharia atual, pois apresenta custo reduzido e facilidade de utilização. Estas tecnologias encontram-se em estudo mais aprofundado de modo a que se possam aplicar em utilizações mais exigentes.

Diversas áreas da engenharia beneficiam do estudo das propriedades mecânicas de peças obtidas por FFF, pelo que o trabalho a desenvolver nesta área é importante. Por isso o principal objetivo deste trabalho foi caracterizar os parâmetros de impressão 3D nas propriedades mecânicas do termoplástico PEEK. Pretende-se otimizar estes parâmetros para que se possa projetar peças obtidas por impressão 3D em PEEK com as melhores propriedades mecânicas possíveis. A maximização do processo pode ter impactos económicos profundos, uma vez que é possível desenhar peças mais leves, mas com igual resistência, sendo que, para algumas aplicações específicas, peças impressas em PEEK com a utilização de otimização topológica, poderão mesmo substituir peças fabricadas em metais com recurso a métodos tradicionais, uma vez que a impressão 3D permite construir estruturas bastante complexas. Salienta-se que a redução de material utilizado por peça também se traduz num maior aproveitamento de recursos e num menor impacto ambiental, duas das maiores preocupações atuais da engenharia.

8. Bibliografia

- [1] C. Barnatt, “3D Printing: Third Edition,” *ExplainingTheFuture.com*, p. 11, 2016.
- [2] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, “Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 10–12, 2013.
- [3] Stephanie Hendrixson, “Infographic: Additive Family Tree: Additive Manufacturing Magazine,” 2015. [Online]. Available: <https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/infographic-additive-family-tree>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [4] B. J. Hiemenz, “3D Printing with FDM: How it Works,” p. 5, 2011.
- [5] “V6 All-Metal HotEnd | E3D Online.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/v6-all-metal-hotend>. [Accessed: 17-Feb-2019].
- [6] R. Moreira, “Conceção de um sistema de medição sem contacto da temperatura do polímero à saída do bico de uma impressora 3D FDM”, Repositório da UP, . Junho 2016.
- [7] “Titan Extruder | E3D Online.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/titan-extruder>. [Accessed: 17-Feb-2019].
- [8] R. Horne and H. K. Kirk, *3D Printing For Dummies*, 2nd Editio. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [9] “RepRap HELIOS | Hackaday.io.” [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/21355-reprap-helios>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [10] “animation belt mouvement - Autodesk Community- Fusion 360.” [Online]. Available: <https://forums.autodesk.com/t5/fusion-360-design-validate/assemble-joint-animation-belt-movement/td-p/6862134>. [Accessed: 16-Sep-2019].
- [11] “University of Oslo Master’s Student Creates Amazing Open Source 5-Axis 3D Printer - 3DPrint.com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing.” [Online]. Available: <https://3dprint.com/77400/5-axis-3d-printer/>. [Accessed: 16-Sep-2019].

- [12] D. Bak, “Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter,” *Assem. Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 340–345, 2003.
- [13] L. K. Takagaki, “IMPRESSÃO 3D : A tecnologia do mometo,” *Pós em Rev. do Cent. Univ. Newt. Paiva*, vol. 11, pp. 48–52, 2015.
- [14] Zortrax, “3D Printing with Automated Post-Processing Stage in Short Run Manufacturing : A Feasibility Study,” 2019.
- [15] B. E. S. e G. D. J. Ram, “Layer-Based Additive Manufacturing Technologies,” in *Materials Processing Handbook*, C. Press, Ed. 2007.
- [16] V. Martin *et al.*, “Engineering a multifunctional 3D-printed PLA-collagen-minocycline-nanoHydroxyapatite scaffold with combined antimicrobial and osteogenic effects for bone regeneration,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 101, pp. 15–26, 2019.
- [17] L. Jyothish Kumar, P. M. Pandey, and D. I. Wimpenny, *3D printing and additive manufacturing technologies*. Springer, 2018.
- [18] A. Haleem and M. Javaid, “Polyether ether ketone (PEEK) and its manufacturing of customised 3D printed dentistry parts using additive manufacturing,” *Clin. Epidemiol. Glob. Heal.*, no. February, pp. 0–1, 2019.
- [19] D. Liu , J. Fu, H. Fan, D. Li, E. Dong, X. Xiao, L. Wang, Z. Guo, “Application of 3D-printed PEEK scapula prosthesis in the treatment of scapular benign fibrous histiocytoma: A case report,” *J. Bone Oncol.*, vol. 12, pp. 78–82, Sep. 2018.
- [20] “Professional 3D printing made accessible | Ultimaker.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/>. [Accessed: 17-Feb-2019].
- [21] A. Manufacturing, P. For, and A. The, “A Path to Certification Qualifying the first polymer for additive manufacturing,” pp. 1–10.
- [22] D. Parker *et al.*, “Polymers, High-Temperature,” *Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2012.
- [23] “VICTREX™ PEEK Polymers | Engineering Thermoplastics - Victrex.” [Online]. Available: <https://www.victrex.com/en/victrex-peek>. [Accessed: 15-Feb-2019].
- [24] B. Black, *Workshop Processes, Practices and Materials*, 5th ed. NY, 2010.

- [25] “PEEK 3D Printing Filament from 3DXTech | Made in the USA | Victrex | KetaSpire | Vestakeep | 3D print with PEEK resin.” [Online]. Available: <https://www.3dxtech.com/thermax-peek-3d-printing-filament/>. [Accessed: 17-Feb-2019].
- [26] “1.75mm Natural 750 gram.” [Online]. Available: <https://www.3d4makers.com/products/peek-filament?variant=9645065142319>. [Accessed: 17-Feb-2019].
- [27] “Peek RepRap PT - 1.75mm 500gr.” [Online]. Available: <https://www.reprap.pt/filamentos/peek/peek-reprap-pt-1-75mm-500gr>. [Accessed: 17-Aug-2019].
- [28] “INNOVATEFIL PEEK.” [Online]. Available: <https://www.smartmaterials3d.com/en/innovatefil/174-innovatefil-peek.html>. [Accessed: 17-Aug-2019].
- [29] J. M. Gardner, C. J. Stelter, E. A. Yashin, and E. J. Siochi, “High Temperature Thermoplastic Additive Manufacturing Using Low-Cost , Open- Source Hardware October 2016,” no. October 2016, 2018.
- [30] “The most advanced PEEK 3D Printer - Including Heated Chamber.” [Online]. Available: <https://tractus3d.com/our-industrial-3d-printers/peek-3d-printer/>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [31] J. Maloch, E. Hnátková, M. Žaludek, and P. Krátký, “Effect of Processing Parameters on Mechanical Properties of 3D Printed Samples,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 919, pp. 230–235, Apr. 2018.
- [32] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, “Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS,” *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, Sep. 2015.
- [33] L. V. Cunha, *Desenho Técnico*, 16th ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.
- [34] “Titan Aqua | E3D Online.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/titan-aqua>. [Accessed: 12-Sep-2019].

- [35] “DyzEnd Pro: High performance, High speed & High flow - DYZE DESIGN.” [Online]. Available: <https://dyzedesign.com/dyzend-pro/>. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [36] “Maximum temperature for the V6 - E3D-Online.” [Online]. Available: https://e3d-online.dozuki.com/Wiki/Maximum_temperatures_for_the_V6. [Accessed: 12-Sep-2019].
- [37] K. Ogata, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, vol. 17, no. 3. 2009.
- [38] “Duet3D Documentation - Duet3D.” [Online]. Available: <https://duet3d.dozuki.com/>. [Accessed: 03-Sep-2019].
- [39] D. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 6th ed. 2004.
- [40] “Victrex | Polymer Crystallinity-HPP Explained-part-3.” [Online]. Available: <https://www.victrex.com/en/blog/2017/polymer-crystallinity-hpp-explained-part-3>. [Accessed: 20-Sep-2019].
- [41] P. Cebe and S. D. Hong, “Crystallization behaviour of poly(ether-ether-ketone),” *Polymer (Guildf)*, vol. 27, no. 8, pp. 1183–1192, 1986.
- [42] P. Wang, B. Zou, H. Xiao, S. Ding, and C. Huang, “Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 271, no. September 2018, pp. 62–74, 2019.
- [43] ISO 527-2, “Determination of tensile properties of plastics (1996).pdf.” .
- [44] ASTM D 638 -02a, “Standard test method for tensile properties of plastics,” *ASTM D 638 -02a*, vol. 08, pp. 46–58, 2003.
- [45] P. Geng *et al.*, “Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament,” *J. Manuf. Process.*, vol. 37, no. September 2018, pp. 266–273, 2019.
- [46] K. M. Rahman, T. Letcher, and R. Reese, “Mechanical properties of additively manufactured peek components using fused filament fabrication,” *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, vol. 2A-2015, no. December, 2015.
- [47] X. Deng, Z. Zeng, B. Peng, S. Yan, and W. Ke, “Mechanical properties optimization of poly-ether-ether-ketone via fused deposition modeling,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no.

2, 2018.

- [48] “Luvocom 3F PEEK 9581 Filament | 3D4Makers | 3D Printing.” [Online]. Available: <https://www.3d4makers.com/products/luvocom-3f-peek-9581-filament?variant=6911646203951>. [Accessed: 20-Sep-2019].

9. Anexos

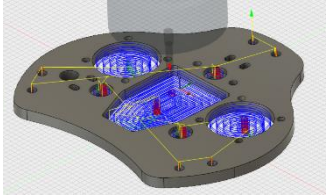
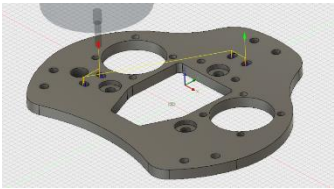
Anexo 1 - Plano de Processo para cabeça de impressão com arrefecimento por ventilação forçada

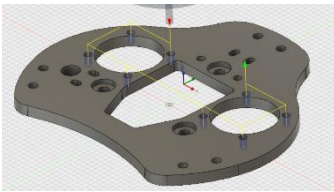
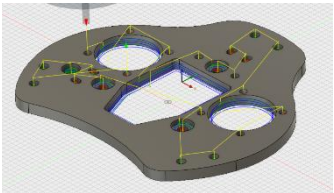
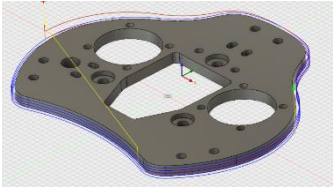
Matéria Prima: Laminado Fibra de Vidro G10 c/5mm de espessura

Máquina: Fresadora CNC 700 x 400

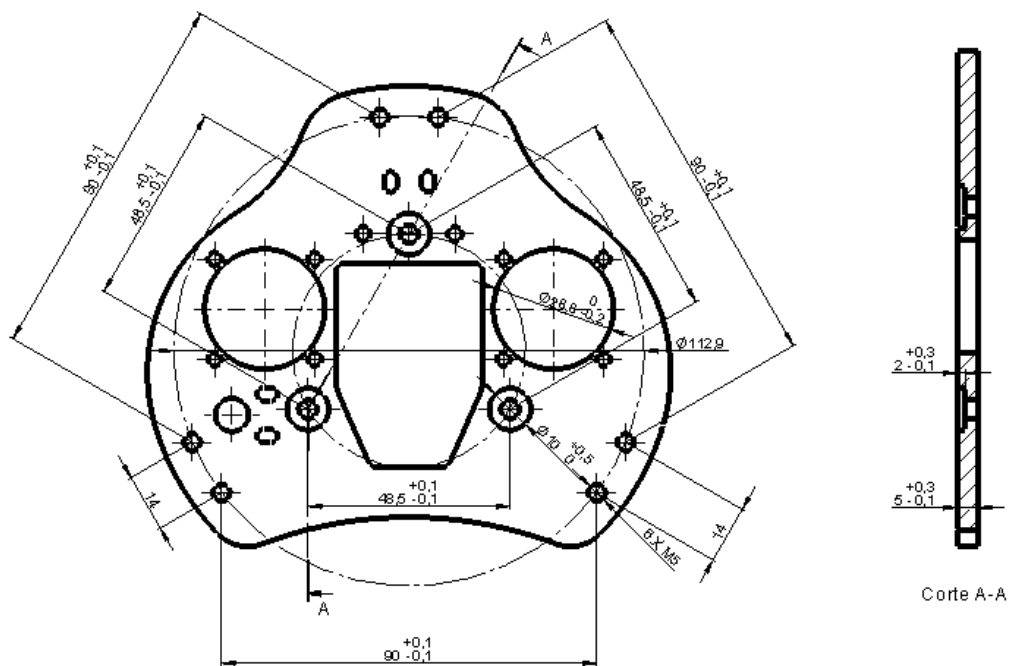
Controlador: Mach 3

Programa: 1001-Effector 2.0

Setup	Nº	Operação	Descrição	Ferramenta e parâmetros de corte
Setup 1	1	Preparação do laminado	Preparar um retângulo de laminado com 135 x 115 mm	Serrote manual
	2	Fixar o laminado bruto	Modo de fixação: Grampos de aperto Maior dimensão orientada em X	Máquina: Fresadora CNC
	3	Desbaste	Abertura das principais cavidades 	Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte a = 0,0045 mm/r vc = 125 mm/min p=1.5mm
	4	Desbaste	Abertura de cavidades secundárias 	Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte a = 0,0045 mm/r vc = 125 mm/min p=2.5mm

	5	Ciclo de furação	<p>Abertura de furos passantes para M3</p> 	<p>Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte</p> <p>$a = 0,0045 \text{ mm/r}$</p> <p>$vc = 125 \text{ mm/min}$</p> <p>Ângulo de hélice $= 2^\circ$</p>
	6	Acabamento	<p>Passagem de acabamento</p> 	<p>Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte</p> <p>$a = 0,0038 \text{ mm/r}$</p> <p>$vc = 100 \text{ mm/min}$</p> <p>$P = 5 \text{ mm}$</p>
	7	Recorte exterior		<p>Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte</p> <p>$a = 0,0045 \text{ mm/r}$</p> <p>$vc = 125 \text{ mm/min}$</p> <p>$P = 1.5 \text{ mm}$</p>
Setup 2	1	Acabamento	<p>Abertura de roscas com macho M5 manualmente</p>	<p>Ferramenta: Macho de roscar M5x0.8</p> <p>---</p>
	2	Acabamento	<p>Remoção de aparas e lixagem das arestas</p>	<p>Lixa 120</p> <p>Lixa 300</p> <p>---</p>
Setup 3	1	Controlo	<p>Controlo dimensional</p>	<p>---</p> <p>---</p>

Croqui para controlo dimensional:



Anexo 2 - Plano de Processo para cabeça de impressão arrefecida a água

Matéria Prima:

Laminado Fibra de Vidro G10 c/5mm de espessura

Máquina:

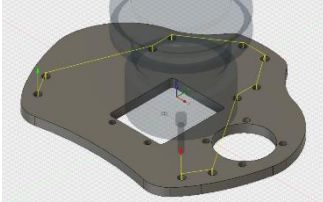
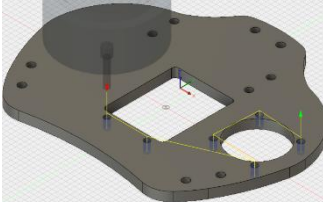
Fresadora CNC 700 x 400

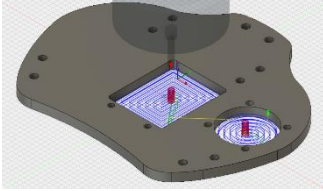
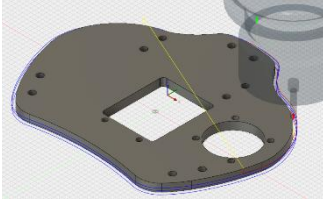
Controlador:

Mach 3

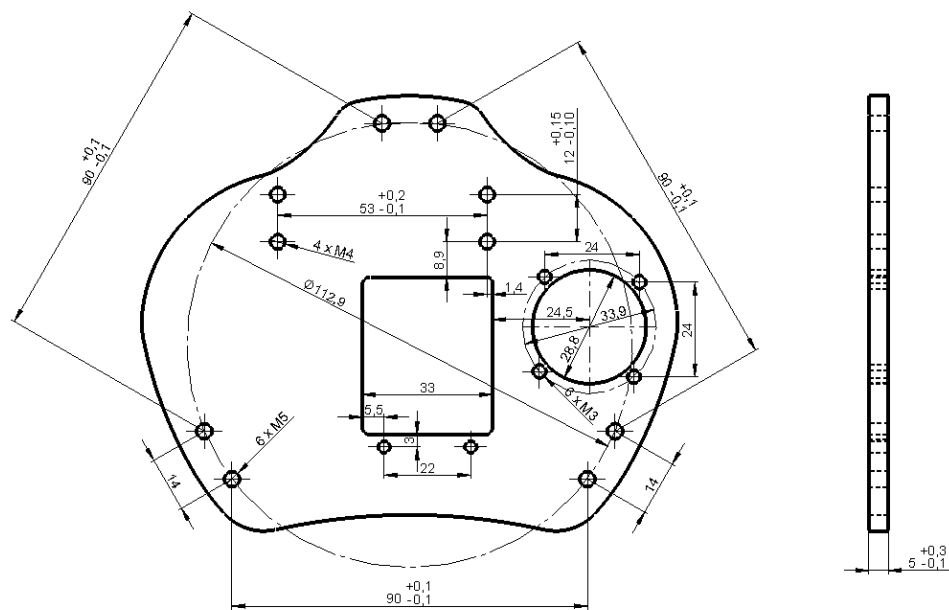
Programa:

1002-Effector 3.0

Setup	Nº	Operação	Descrição	Ferramenta e parâmetros de corte
Setup 1	1	Preparação do laminado	Preparar um retângulo de laminado com 145 x 120 mm	Serrote manual
	2	Fixar o laminado bruto	Modo de fixação: Grampos de aperto Maior dimensão orientada em X	Máquina: Fresadora CNC
	3	Ciclo de furação	Abertura dos furos primários 	Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte a = 0,0045 mm/r vc = 125 mm/min ângulo de hélice = 2°
	4	Ciclo de furação	Abertura de furos secundários 	Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte a = 0,0045 mm/r vc = 125 mm/min ângulo de hélice = 2°

	5	Desbaste	<p>Abertura de cavidades interiores</p> 	<p>Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte</p> <p>$a = 0,0045 \text{ mm/r}$</p> <p>$v_c = 125 \text{ mm/min}$</p> <p>$P = 1.5 \text{ mm}$</p>
	7	Desbaste	<p>Recorte exterior</p> 	<p>Ferramenta: Fresa de aço duro com Ø3mm e 2 gumes de corte</p> <p>$a = 0,0045 \text{ mm/r}$</p> <p>$V_c = 125 \text{ mm/min}$</p> <p>$P = 1.5 \text{ mm}$</p>
Setup 2	1	Acabamento	<p>Abertura de roscas com macho M5, M4 e M3 manualmente</p>	<p>Ferramenta:</p> <p>Macho de roscar M5x0.8 M4x0.7 e M3x0.5</p> <p>---</p>
	2	Acabamento	<p>Remoção de aparas e lixagem das arestas</p>	<p>Lixa 120</p> <p>Lixa 300</p> <p>---</p>
Setup 3	1	Controlo	<p>Controlo dimensional</p>	<p>---</p> <p>---</p>

Croqui para controlo dimensional:



Anexo 3 - Plano de Processo para suporte do termoventilador

Matéria Prima:

Alumínio 1015 c/ 3mm de espessura

Máquina:

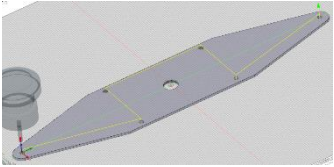
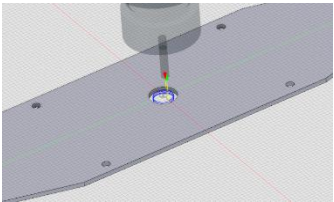
Fresadora CNC 700 x 400

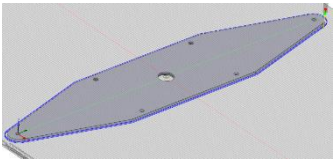
Controlador:

Mach 3

Programa:

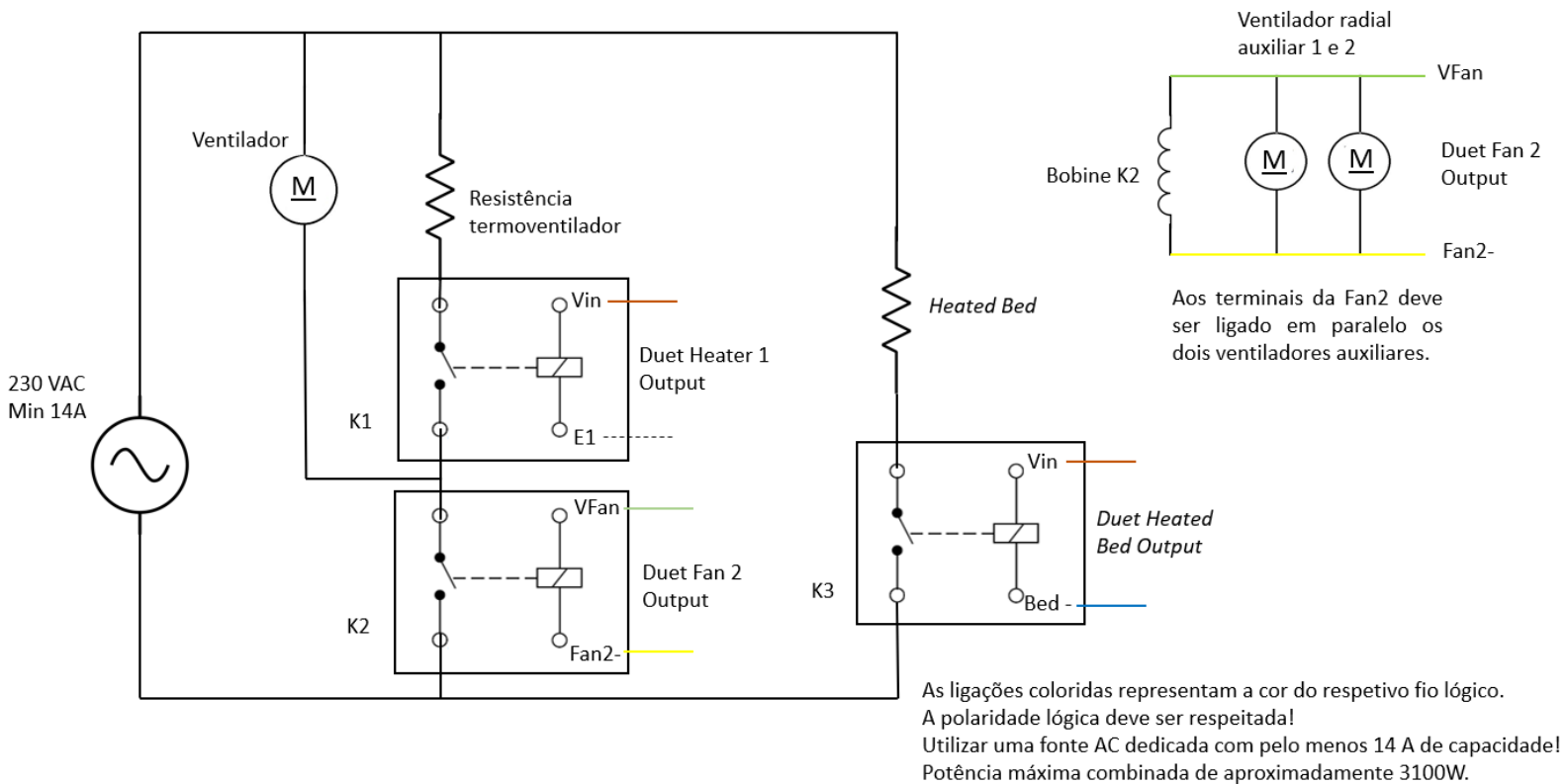
1002-Termo

Setup	Nº	Operação	Descrição	Ferramenta e parâmetros de corte
Setup 1	1	Preparação do laminado	Preparar um retângulo de laminado com 100 x 465 mm	Serrote manual
	2	Fixar a chapa em bruto	Modo de fixação: Grampos de aperto Maior dimensão orientada em Y	Máquina: Fresadora CNC
	3	Ciclo de furação	Abertura da furação para fixação 	Ferramenta: Fresa de aço rápido com Ø5mm e 1 gume de corte a = 0,03 mm/r vc = 150 mm/min passo hélice = 1mm
	4	Desbaste	Abertura de cavidade 	Ferramenta: Fresa de aço rápido com Ø5mm e 1 gume de corte a = 0,03 mm/r vc = 150 mm/min passo hélice = 1mm

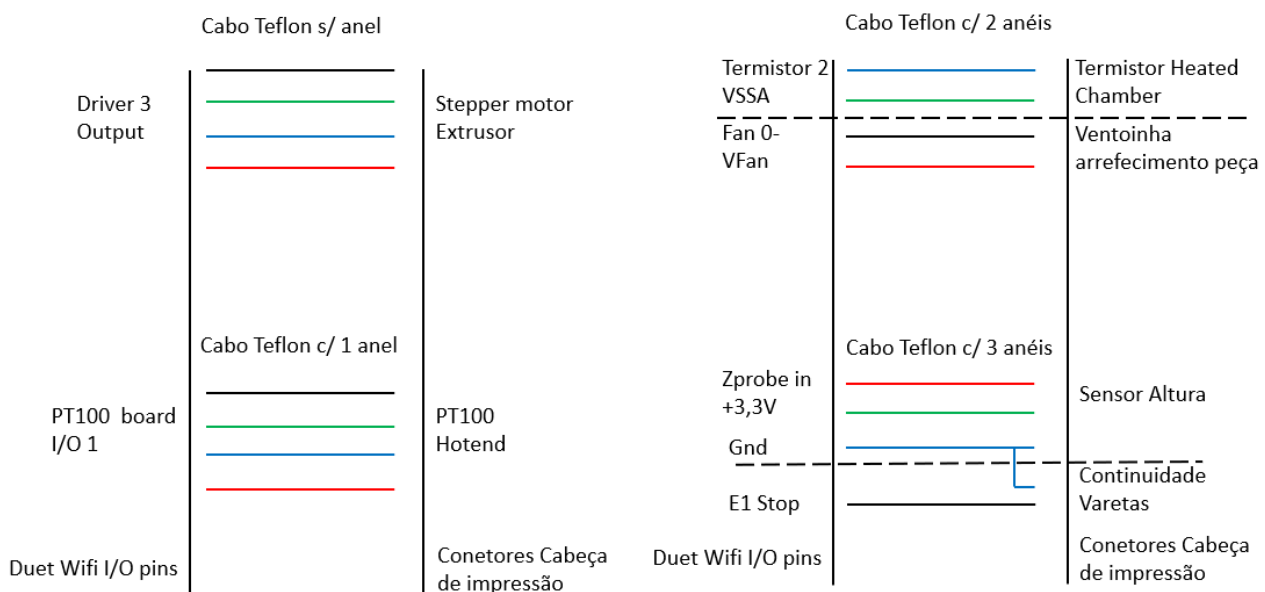
	5	Ciclo de furação	Abertura de furos passantes para M3	Ferramenta: Fresa de aço rápido com Ø5mm e 1 gume de corte $a = 0,0045 \text{ mm/r}$ $vc = 125 \text{ mm/min}$ $\text{Ângulo de hélice} = 2^\circ$
	6	Desbaste	Recorte exterior 	Ferramenta: Fresa de aço rápido com Ø5mm e 1 gume de corte $a = 0,03 \text{ mm/r}$ $vc = 150 \text{ mm/min}$ $p = 1.5 \text{ mm}$
Setup 2	1	Acabamento	Remoção de aparas e lixagem das arestas	Lixa 120 ---
	2	Quinagem	Quinagem pelas referências no desenho técnico	Quinadeira com matriz de raio 5mm ---
Setup 3	1	Controlo	Controlo dimensional	--- ---

Anexo 4 - Esquemas elétricos

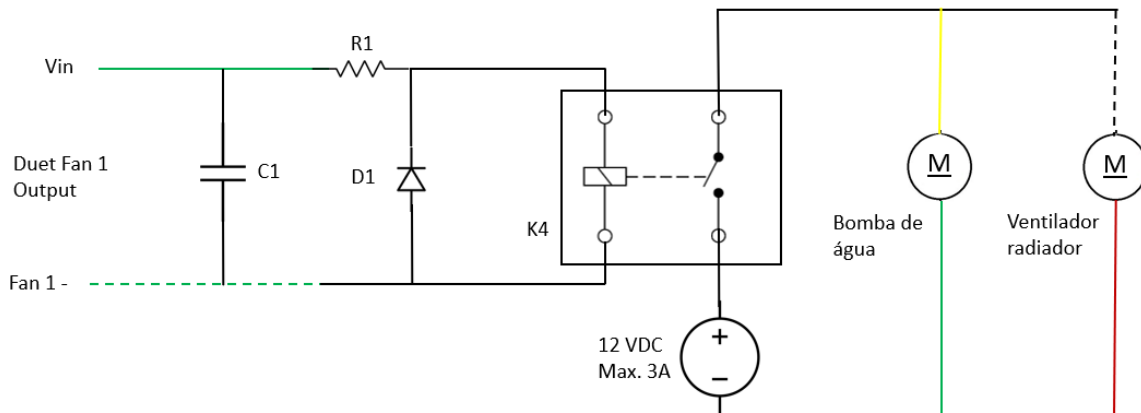
Circuito para controlo dos circuitos de potência em AC



Ligações Chicote elétrico: Pinos de I/O do Duet Wifi para conetores na cabeça de impressão

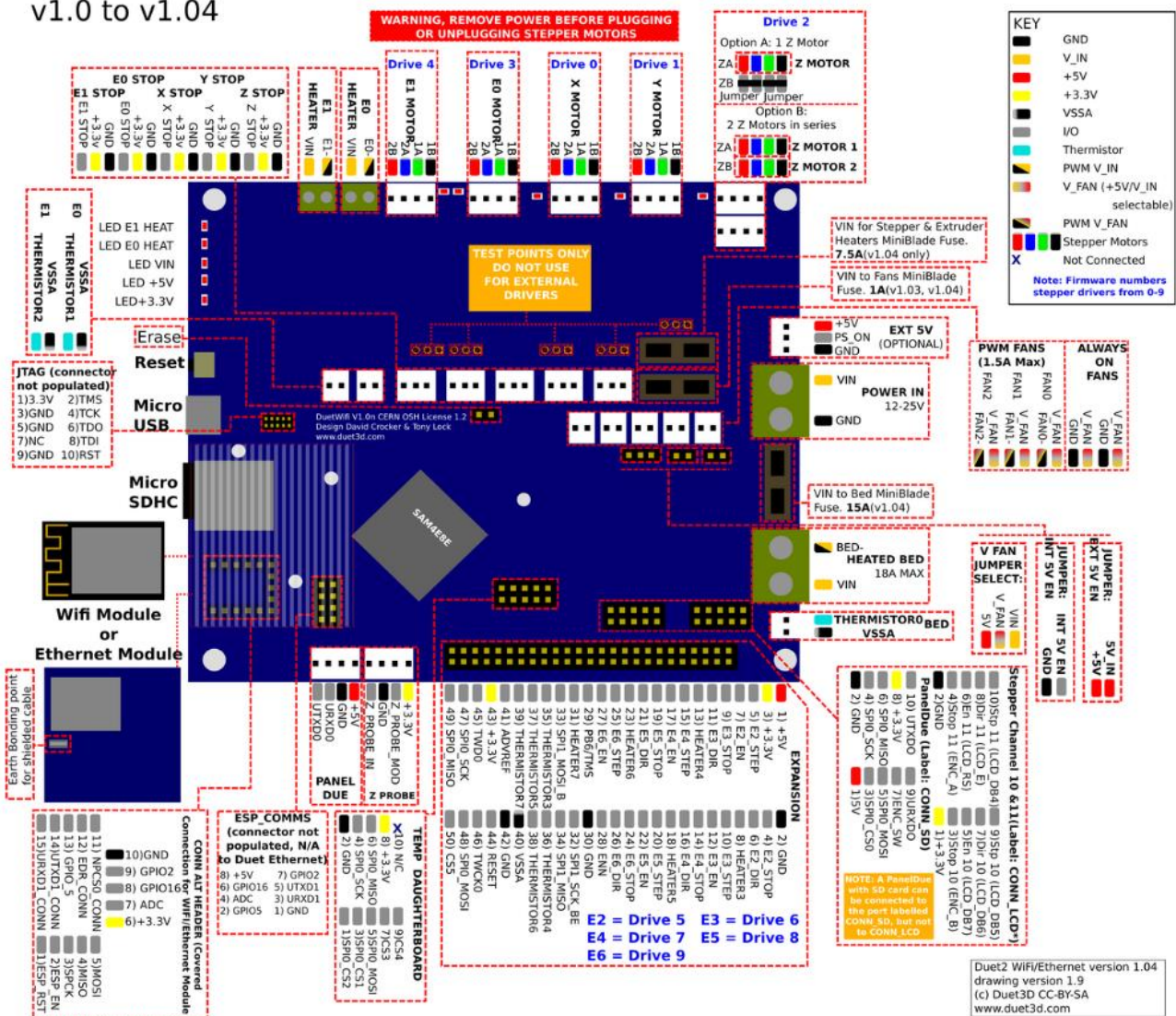


Circuito para controlo do circuito de refrigeração



Duet Wifi / Duet Ethernet Connections

v1.0 to v1.04



Anexo 5 – Código G de configuração da Delta IPS

Código para cabeça de impressão arrefecida por água e impressão de PEEK

```
; Configuration file for Duet WiFi (firmware version 1.21)
; executed by the firmware on start-up
;
; generated by RepRapFirmware Configuration Tool on Thu Aug 02 2018 19:45:58 GMT+0100 (Hora de verão da Europa Ocidental)
;
; General preferences
G90 ; Send absolute coordinates...
M83 ; ...but relative extruder moves
M555 P1 ; Set firmware compatibility to look like RepRapFirmware

;*** The homed height is deliberately set too high in the following - you will adjust it during calibration.
; Correr o G32 para obter novos parâmetros
M665 R237.472 L477.403 B110 H847.181 X-0.391 Y0.390 Z ; Set delta radius, diagonal rod length, printable radius and homed height
M666 X2.31 Y0 Z-2.31 ; Put your endstop adjustments here, or let auto calibration find them

; Network
M550 PDeltaIPS ; Set machine name
M551 Pe211 ; Set password
M552 S2 ; Enable Access Point
;M589 S"DeltaIPS" P"E211E211" I10.10.10.10 ; Configure access point and IP addresses.
;M587 S"iPhone do Ricardo" P"9668803RC" I192.168.1.14 J192.168.1.254 K255.255.255.0 ; Configure access point and IP addresses. You can delete this line once connected
;M587 S"E211" P"E211E211"; Configure access point and IP addresses. You can delete this line once connected
M586 P0 S1 ; Enable HTTP
M586 P1 S0 ; Disable FTP
M586 P2 S0 ; Disable Telnet

; Drives
M569 P0 S1 ; Drive 0 goes forwards
M569 P1 S1 ; Drive 1 goes forwards
M569 P2 S1 ; Drive 2 goes forwards
M569 P3 S0 ; Drive 3 goes backwards
M350 E16 I0 ; Configure microstepping without interpolation
M350 X16 Y16 Z16 I1 ; Configure microstepping with interpolation
M92 X179.31 Y179.31 Z179.31 E984 ; Set steps per mm
M566 X1200 Y1200 Z1200 E1200 ; Set maximum instantaneous speed changes (mm/min)
M203 X10000 Y10000 Z10000 E2200 ; Set maximum speeds (mm/min)
M201 X1000 Y1000 Z1000 E1000 ; Set accelerations (mm/s^2)
M906 X1600 Y1600 Z1600 E1700 I30 ; Set motor currents (mA) and motor idle factor in per cent
M84 S30 ; Set idle timeout

; Axis Limits
M208 Z-2.5 S1 ; Set minimum Z

; Endstops
M574 X2 Y2 Z2 S0 ; Set active high endstops
M591 D1 P1 C4
```

```

; Z-Probe
M558 P1 F100 H3 T5000 ;
M558 P2 H10 F120 T2400 ; Set Z probe type to modulated and the dive height + speeds
G31 P500 X20 Y-12 Z2.25 ; Set Z probe trigger value, offset and trigger height
M557 R160 S60 ; Define mesh grid

; Heaters
M307 H0 B0 S1.00 ; Disable bang-bang mode for the bed heater and set PWM limit
M305 P0 X201 T111 S"Bed" ; Configure PT100 for heater 0 - BED S"Bed" R100 T111
M143 H0 S205 ; Set temperature limit for heater 0 to 175C - BED
M305 P1 X200 S"HotEnd" ; Configure PT100 for hot end heater 1 S"HotEnd" R100
M143 H1 S420 ; Set temperature limit for heater 1 to 270C - hot end heater
M307 H1 A841.6 C240.6 D5.5 S1.0 V24.5 ; PID settings for extruder
M141 H2 ; Set heater 2 as heated chamber
M305 P2 T100000 B3970 R4700 S"Chamber" ; Configure termistor for H2 "Chamber"
M307 H2 M307 H2 A100 C160 D10 S1.0 ; PID settings for Heated Chamber

; Fans
M106 P0 S0 I0 F500 H-1 ; Set fan 0 value, PWM signal inversion and frequency. Thermostatic control is turned off
M106 P1 S1 I0 F500 H1 T45 ; Set fan 1 value, PWM signal inversion and frequency. Thermostatic control is turned on @45°C
M106 P2 S1 I0 F50 H2 T35 ; Set fan 2 value, PWM signal inversion and frequency. Thermostatic control is turned off

; Tools
M563 P0 D0 H1 ; Define tool 0
G10 P0 X0 Y0 Z0 ; Set tool 0 axis offsets
G10 P0 R0 S25 ; Set initial tool 0 active and standby temperatures to 25C

; Automatic power saving
M911 S10 R11 P"M913 X0 Y0 G91 M83 G1 Z3 E-5 F1000" ;Set voltage thresholds and actions to run on power loss

; Miscellaneous
T0 ; Select first tool
M579 X1.014591 Y1.0214009 Z1,001500417 ; Set axis compensation Xnnn= (Xexpected dimension/Xreal ;
dimension), eg: (X0.9=(100/110))
M556 S90 X0.02 Y0.145551 Z0.01 ; Set axis Skew compensation S=comprimento do cateto grande do
triângulo X;Y;Z= cateto pequeno dado
; ; pelo conseno do angulo medido entre os eixos. Eixos XY =
parametro X, YZ = Y, XZ = Z
; ; Ângulos obtusos X,Y,Z positivos, ângulos agudos parâmetros
negativos

```


Anexo 6 – Números de série de equipamentos de medição utilizados

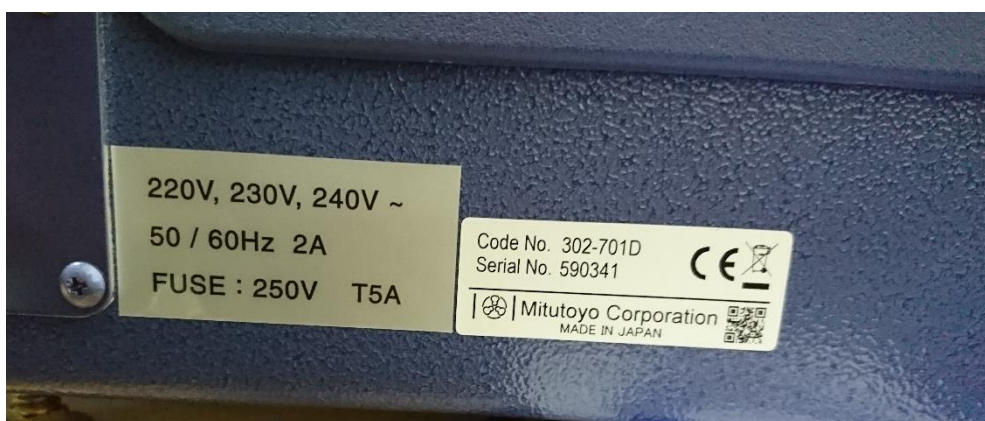


Figura 67 - Número de série do projetor de perfis



Figura 68 - Número de série da câmara de infravermelhos

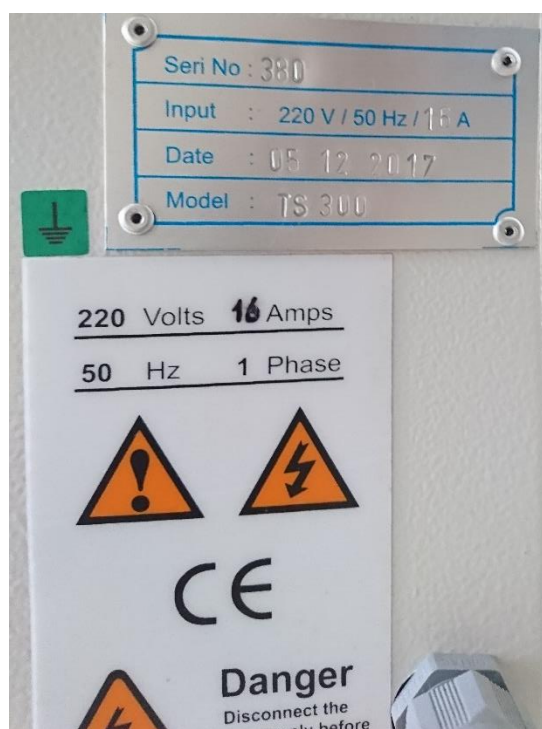


Figura 69 - Número de série da máquina de ensaio de tração uniaxial



Figura 70 - Número de série do paquímetro utilizado na medição dos provetes

Anexo 7 – Desenhos técnicos

IPS 1.1 – Portas da frente (desenho para aquisição de material)

IPS 1.2 – Portas laterais (desenho para aquisição de material)

Delta IPS 2019 01 – Montagem da cabeça de impressão

Delta IPS 2019 02 – *Effector* 3.0

Delta IPS 2019 03 – Suporte sonda para Aqua

Delta IPS 2019 04 – Suporte ventilador

Delta IPS 2019 05 – Conduta

Delta IPS 2019 06 – Suporte para Termoventilador

Delta IPS 2019 07 – Fixação para Titan Aqua

Delta IPS 2019 08 – Montagem da Dobradiça

Delta IPS 2019 09 – Dobradiça a

Delta IPS 2019 10 – Dobradiça b

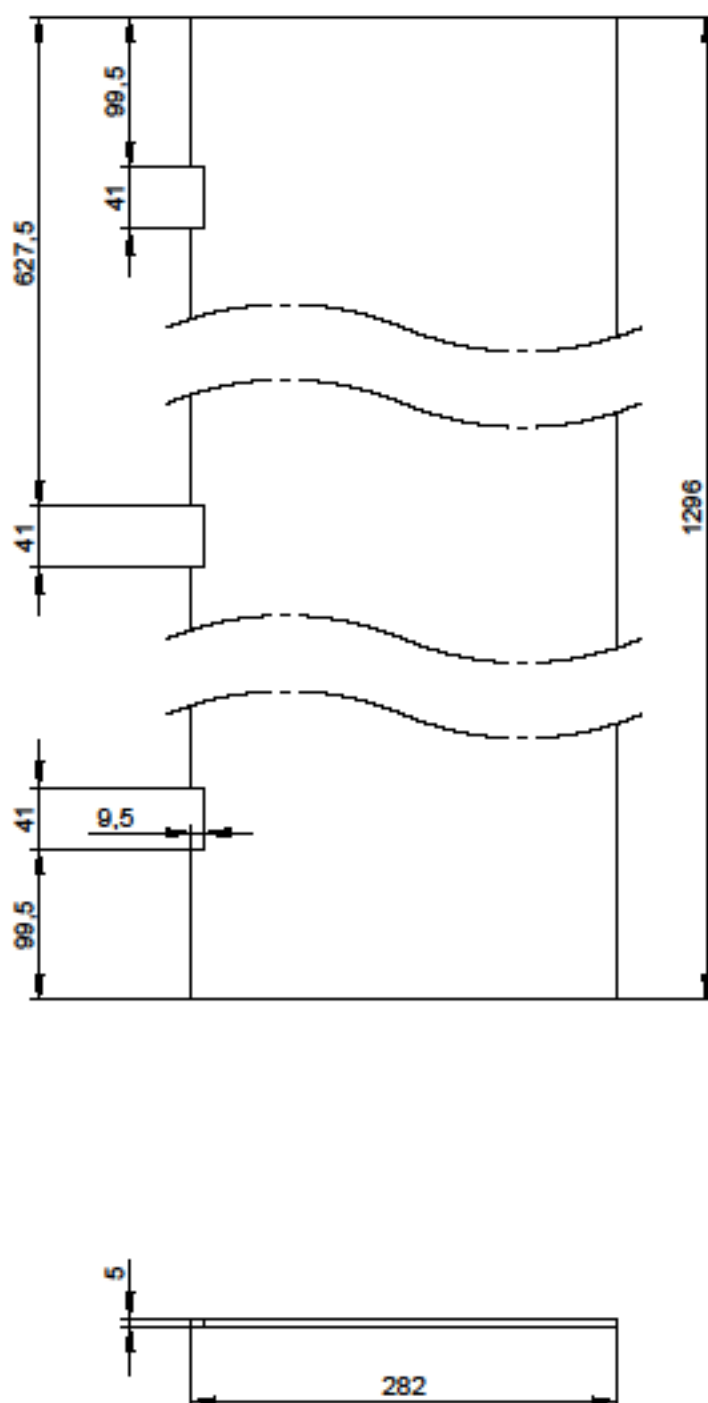
Delta IPS 2019 11 – Veio para dobradiça

Delta IPS 2019 12 – *Effector* 2.0

Proj.		
Des.		
Copiar		
Visor		

IPS - ESTS
DeltaIPS

Diogo Machado
45698



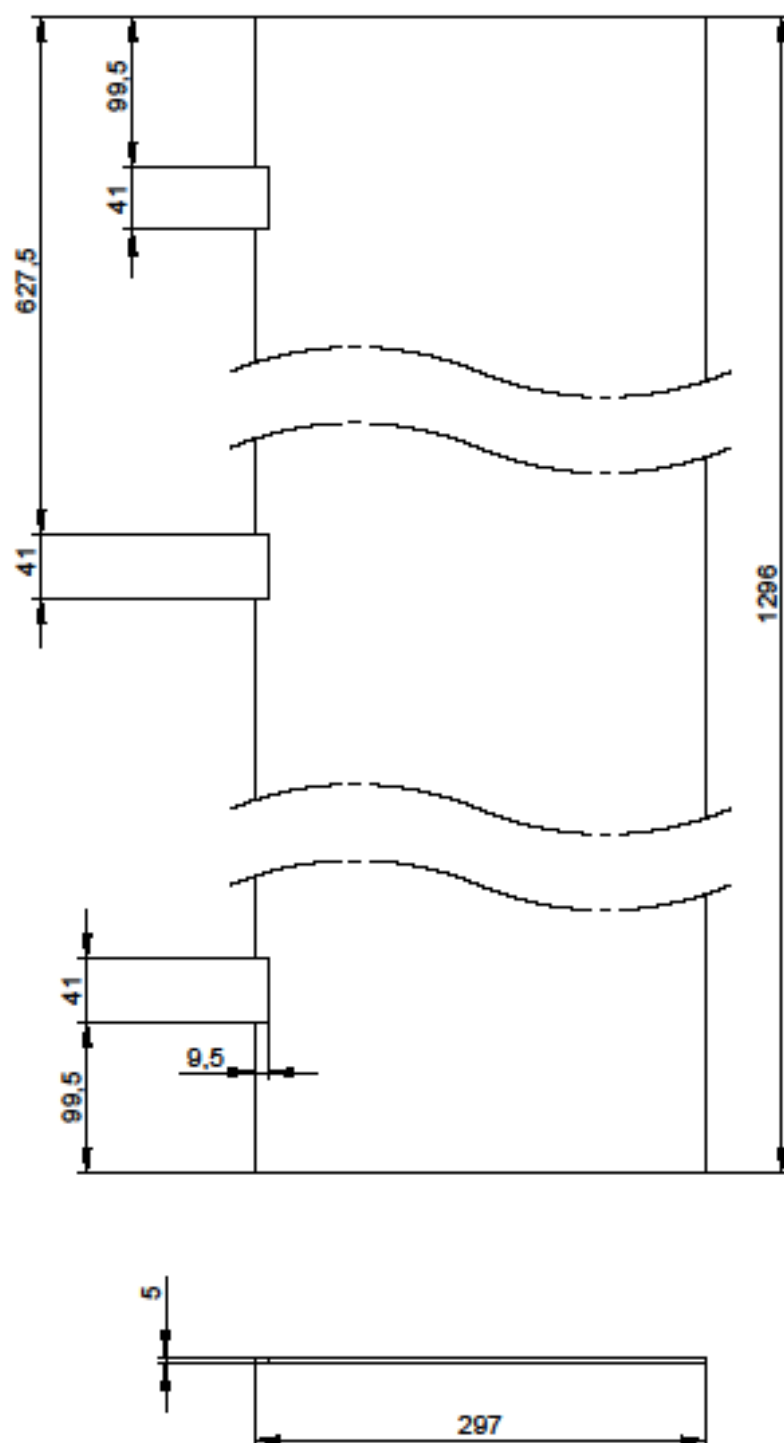
Notas:
- Material: Chapa de Polycarbonato com 5 mm de espessura
- Quantidade: 2 unidades

1:5
Toleran.
NP
189:1962
IT 13

Porta da frente

IPS 1.1

Proj.			IPS - ESTS DeltaIPS	Diogo Machado 45698
Des.				
Copiar				
Impr				

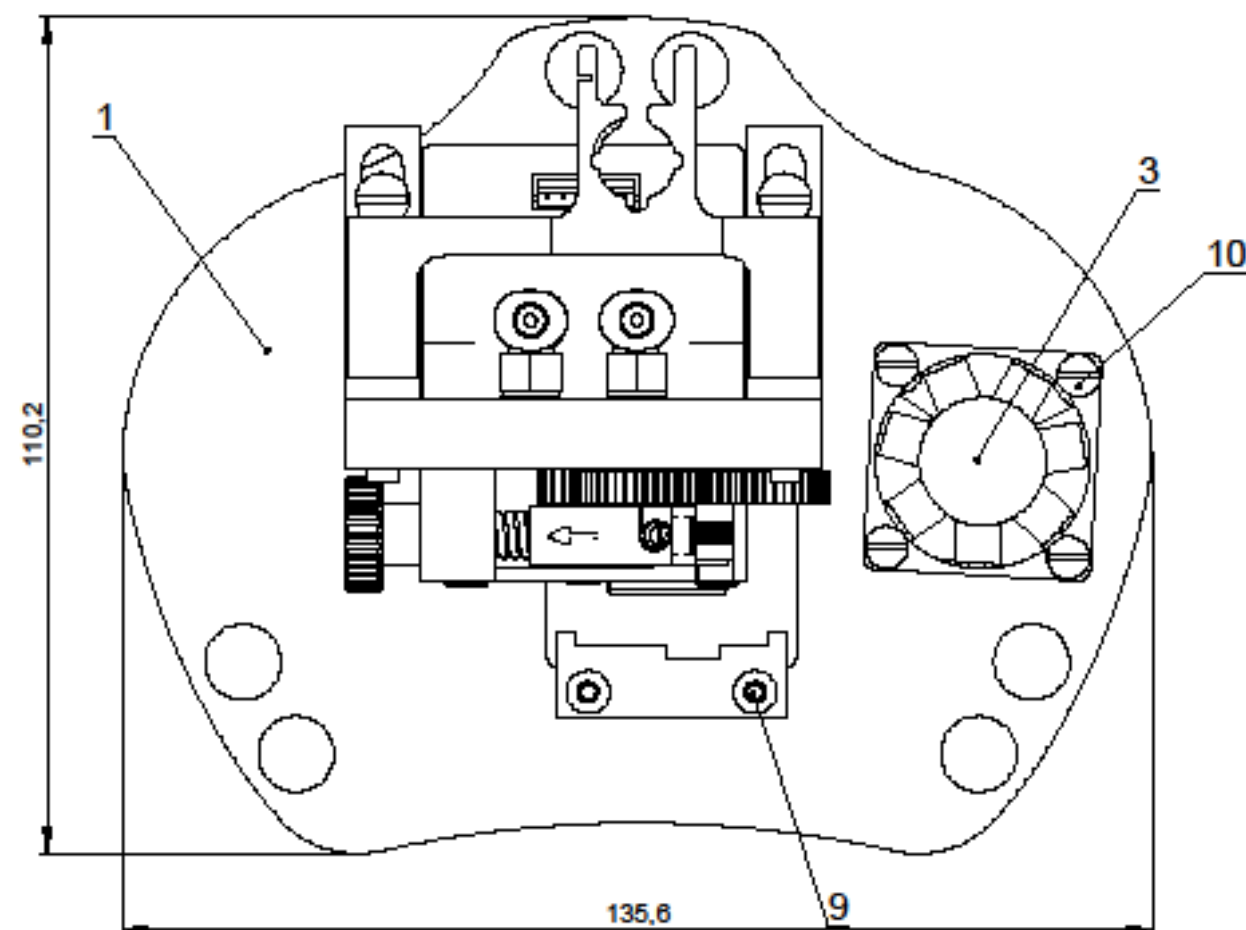
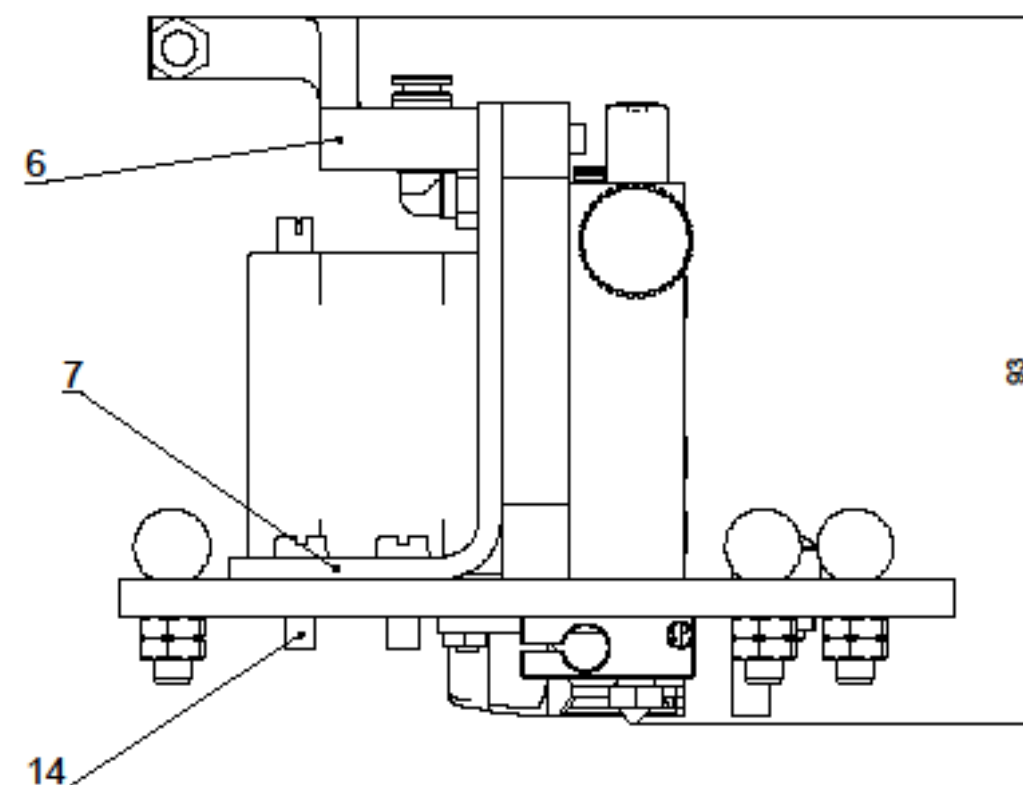
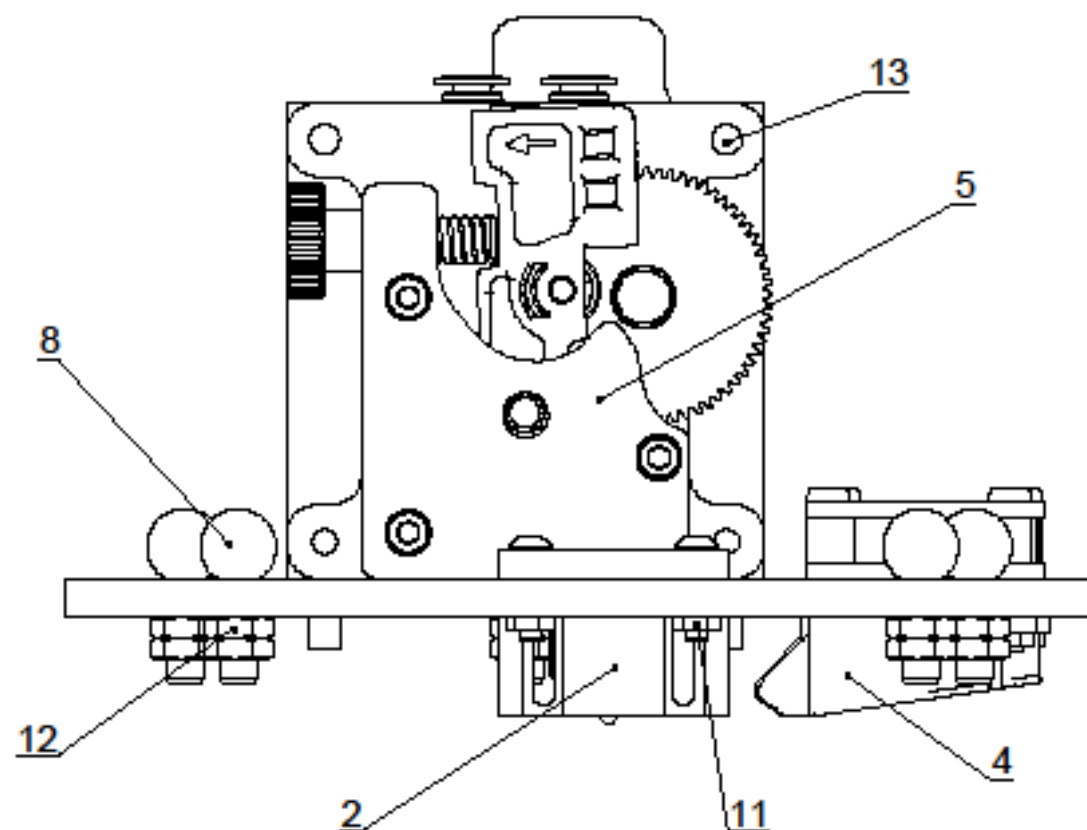


Notas:
 - Material: Chapa de Polycarbonato com 5 mm de espessura
 - Quantidade: 4 unidades

1:5
 Toleran.
 NP
 189:1962
 IT 13

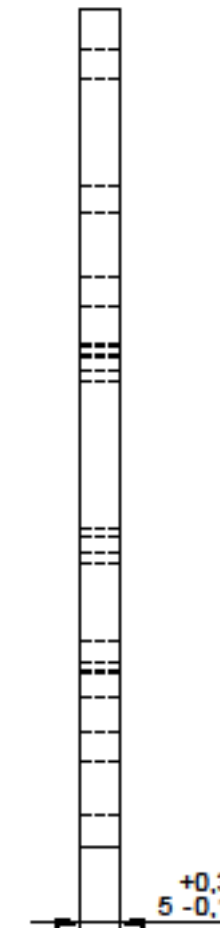
Portas laterais

IPS1.2

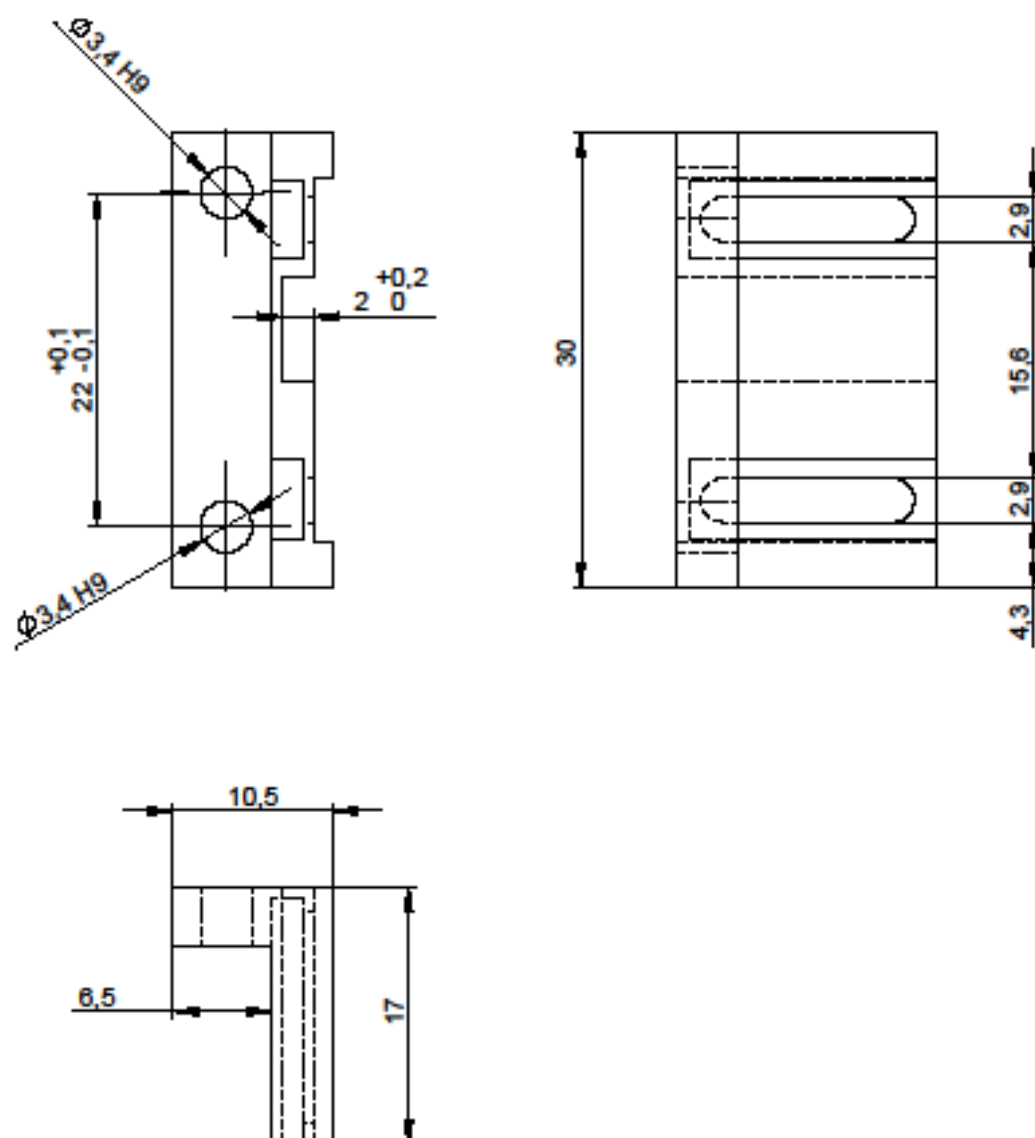


4	Parafuso M5x12	ISO 1207	Aço carbono	14				
2	Parafuso M5x25	ISO 1207	Aço carbono	13				
12	Porca M5	ISO 4035	Aço carbono	12				
5	Porca M3	ISO 4036	Aço carbono	11				
4	Parafuso M3x20	ISO 1580	Aço carbono	10				
2	Parafuso M3x12	ISO 7380	Aço carbono	9				
6	Rótulo magnética		AISI 1045	8		0.006		
2	Suporte extrusor	DeltaIPS 2019-06	Alumínio 1060	7		0.007		
1	Porta cabos		Nylon PA66 c/ F.V.	6		0.007		
1	E3D Titan		Vários	5		0.350		
1	Conduta	DeltaIPS 2019-03	Nylon PA66 c/ F.V.	4		0.003		
1	Ventoinha 24V 30x30mm		Polycarbonato	3		0.010		
1	Suporte Sonda para Água	DeltaIPS 2019-02	Nylon PA66 c/ F.V.	2		0.005		
1	Effector 3	DeltaIPS 2019-01	Fibra de Vidro Q10	1		0.113		
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE	Nº DA MATRIZ	PEÇO	OBSERVAÇÕES

Proj.								
Des.								
Copiou								
Visto								
Escala 1:1	ESTS - IPS, FCT - UNL DELTA IPS							Diogo Machado 45698
Toleran.	Montagem da cabeça de impressão c/ E3D Aqua							DeltaIPS 2019-1



Proj.			ESTS - IPS, FCT - UNL Delta IPS	Diogo Machado 45698
Des.				
Copilar				
Valid				



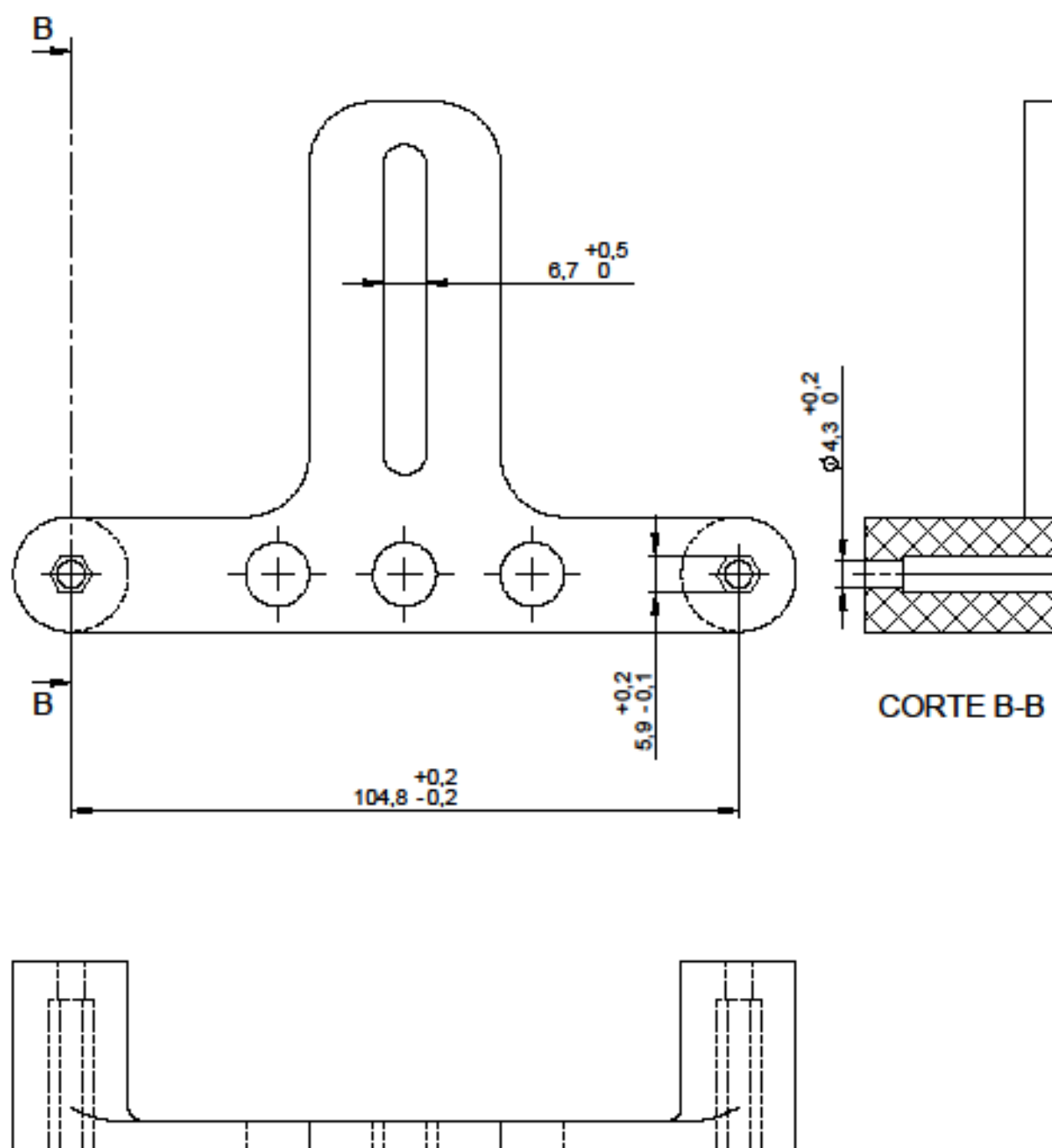
	1:1	Suporte Sonda para Aqua	Delta IPS 2019-03
	Toleran NP		
	189:1962		
	IT10		

Proj.		
Des.		
Desenho		
Verbo		

ESTS - IPS, FCT-UNL

Delta IPS

Diogo Machado
45698



1:1
Toleran.
NP
189:1962
IT 12

*Suporte para
ventilador radial*

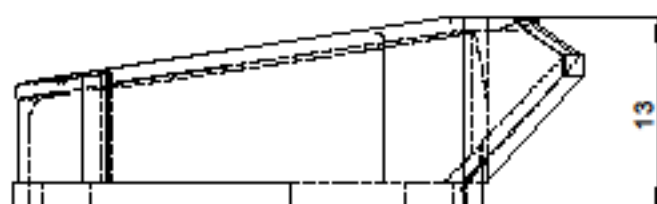
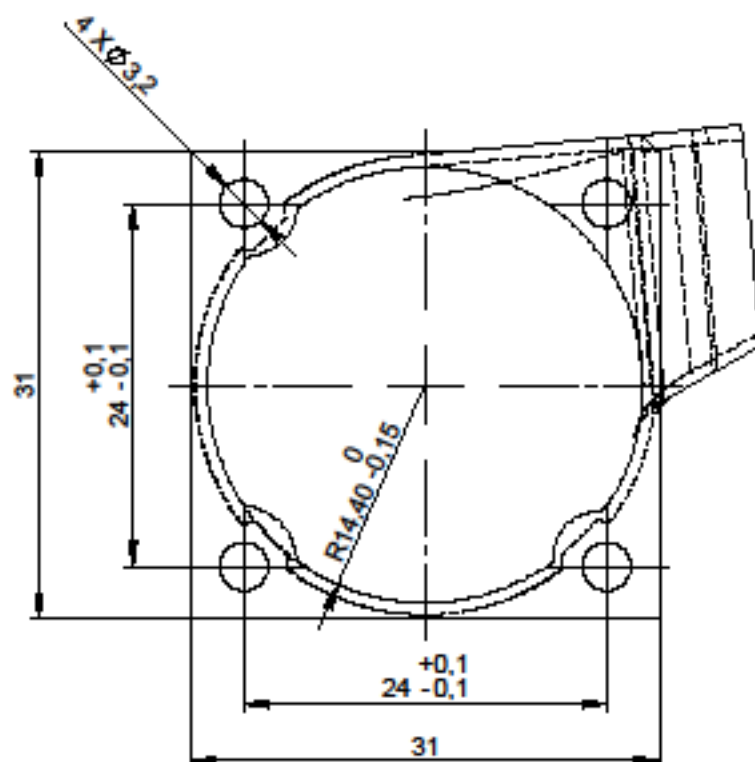
DeltaIPS 2019-04

Proj.		
Des.		
Desenho		
Visto		

ESTS - IPS, FCT - UNL

Delta IPS

Diogo Machado
45698



2:1

Toleran.
NP
189:1962
12

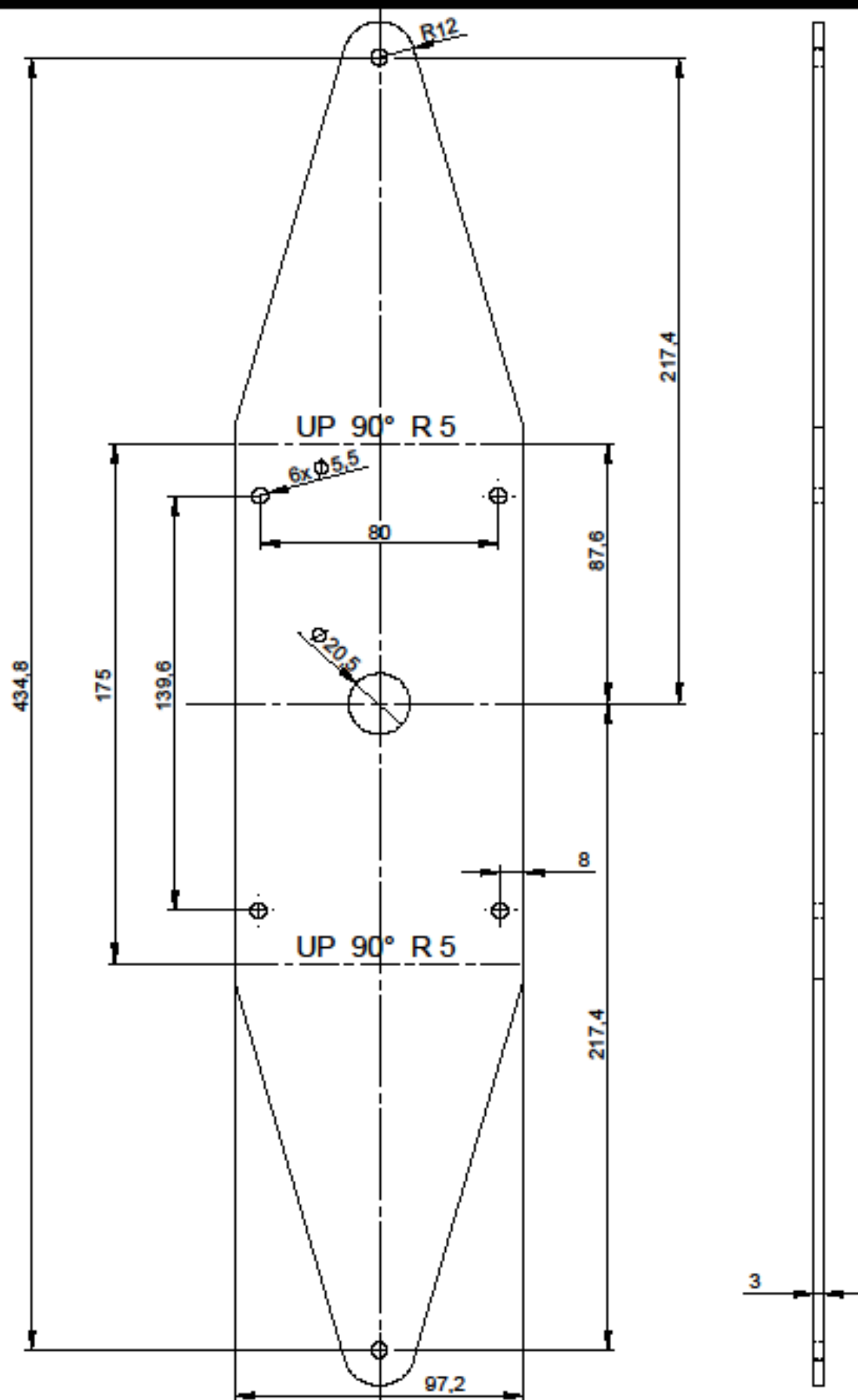
Conduta

DeltaIPS 2019-05

Proj.	8/7/2019
Des.	8/7/2019
Compr.	
Valid.	8/7/2019

IPS - ESTS, FCT - UNL
DELTA IPS

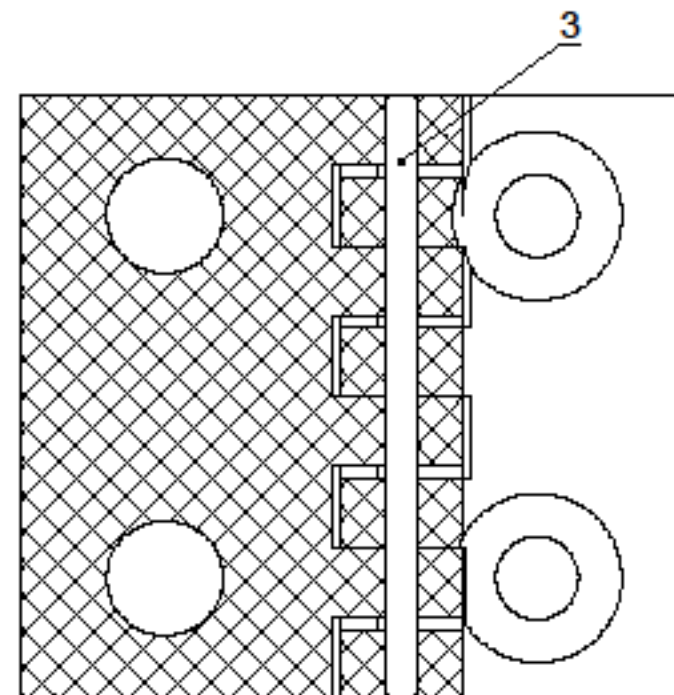
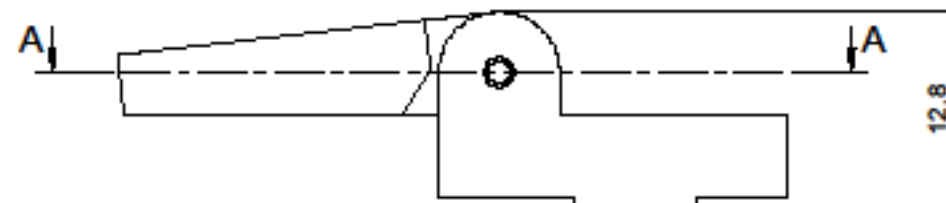
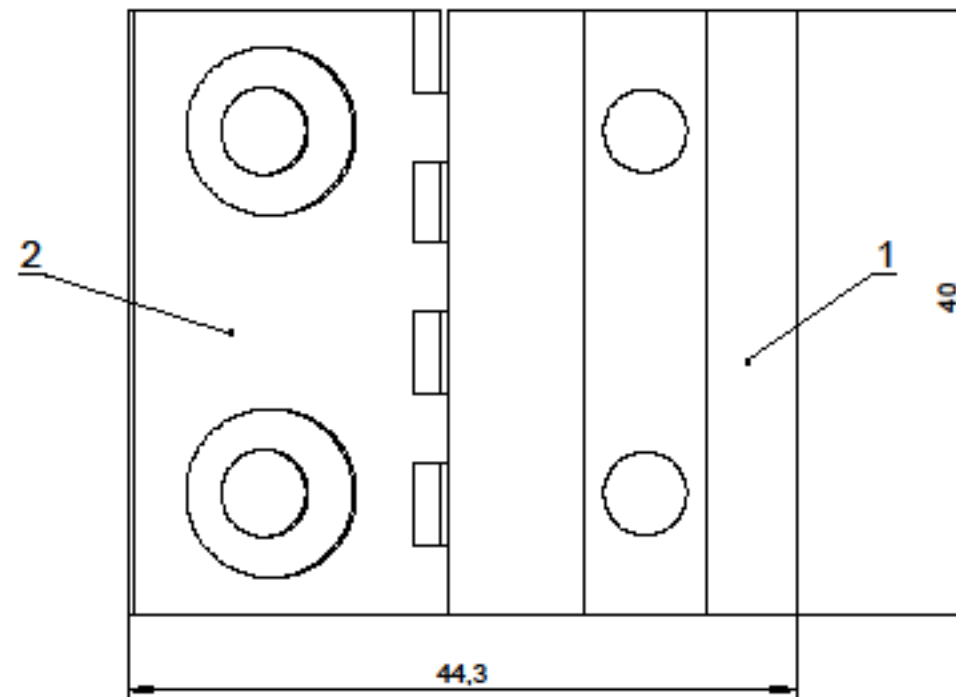
Diogo Machado
45698



1:2
Toleran.
NP
189:1962
IT 11

*Suporte
Termoventilador*

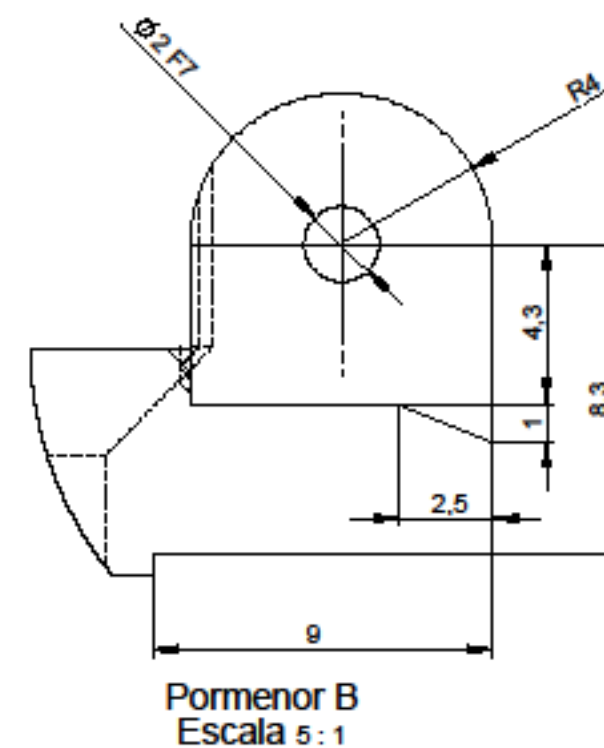
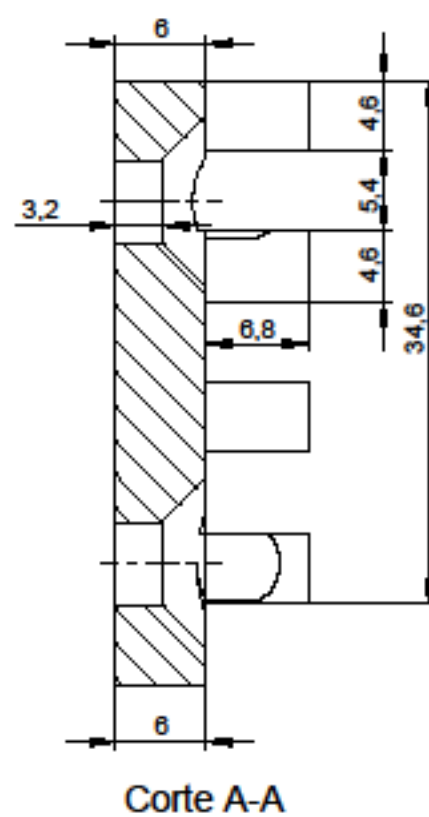
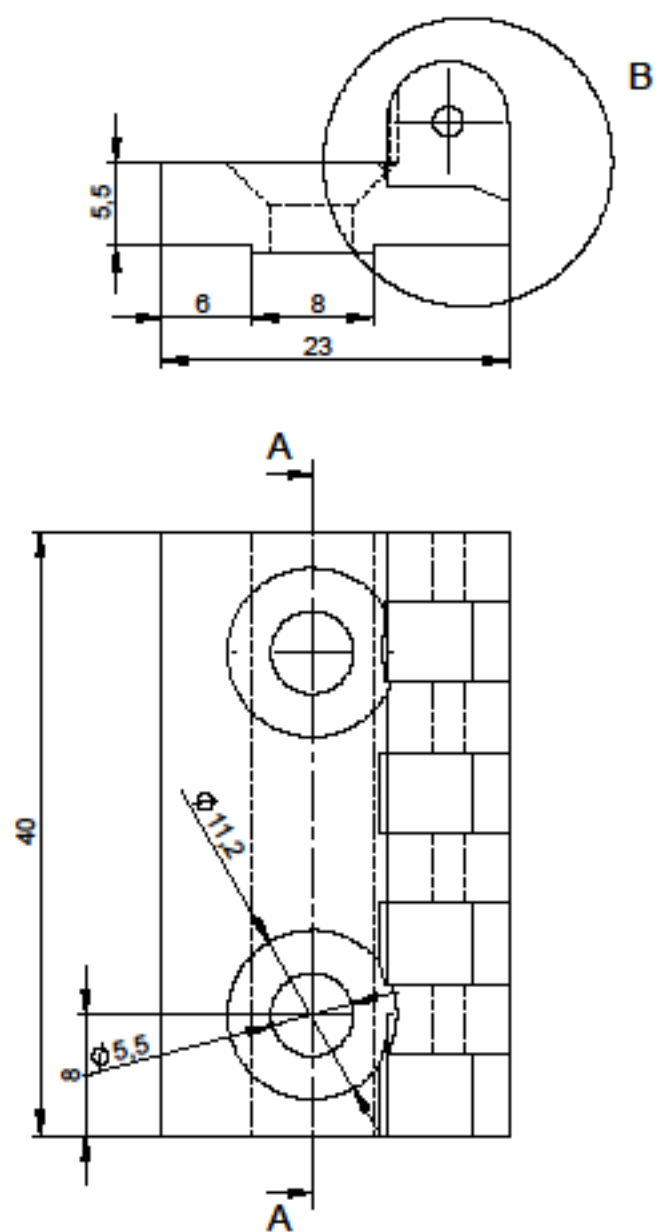
DeltaIPS 2019-6



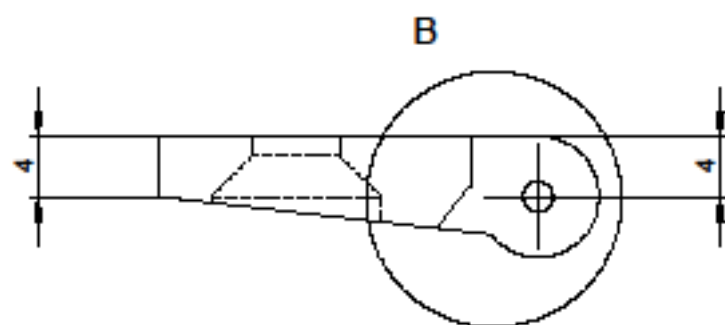
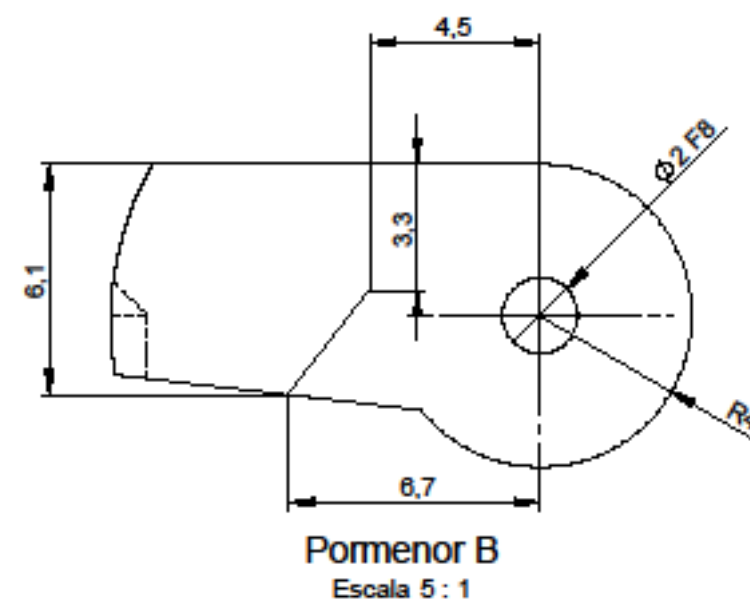
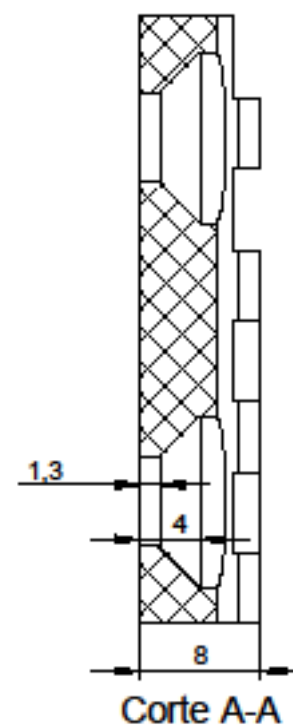
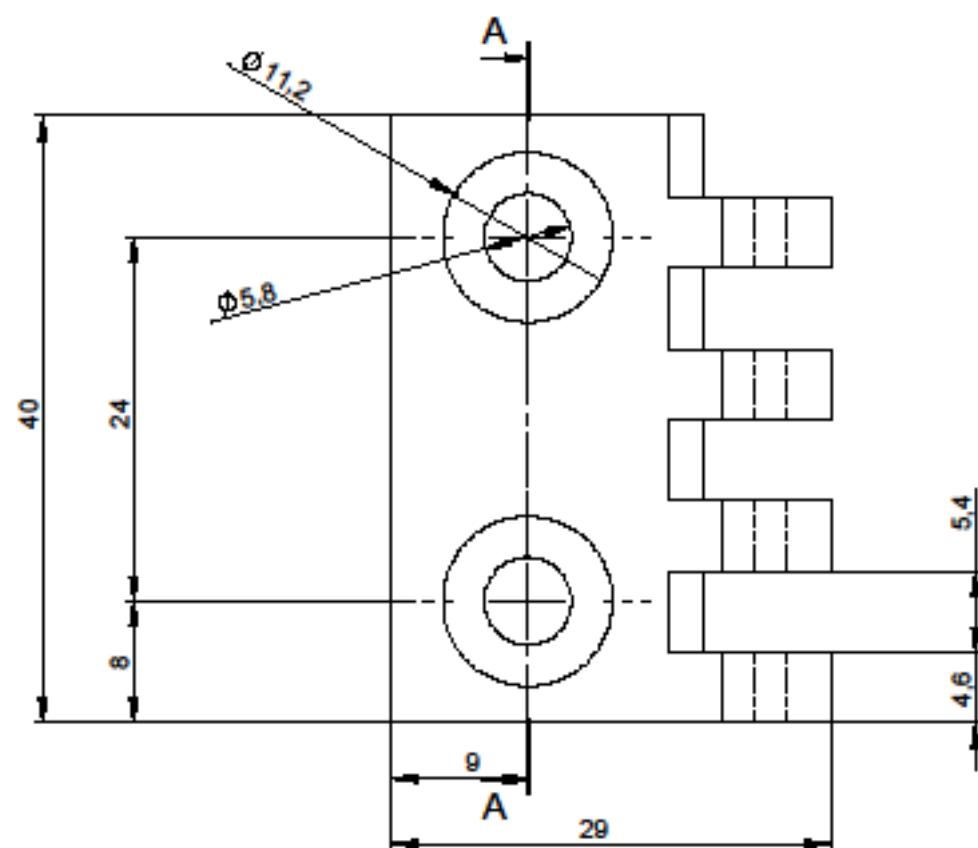
Corte A-A

1	Velo p/ dobradiças	Delta IPS 2019-8	AISI 304	3		0.001	
1	Dobradiça b	Delta IPS 2019-10	ABS	2		0.005	
1	Dobradiça a	Delta IPS 2019-9	ABS	1		0.005	
Nº	DESIGNAÇÃO	Nº DA NORMA Nº DO DESENHO	MATERIAL	Nº REF.	PRODUTO SEMI ACABADO Nº DO MOLDE Nº DA MATRIZ	PEÇO	OBSERVAÇÕES

	Proj.			IPS - ESTS FCT - UNL Delta IPS	Diogo Machado 45898				
	Des.								
	Copiou								
	Visto								
	Escala 2:1	<i>Montagem Dobradiças</i>			Delta IPS 2019 8				
	Toleran.								



	Proj.			ESTS - IPS, FCT - UNL Delta IPS	Diogo Machado 45898			
	Des.							
	Copiar							
	Visto							
	Escala 1:1 (5:1)	<i>Dobradiça a</i>			Delta IPS 2019-9			
Toleran. NP 189-1962 IT 10								



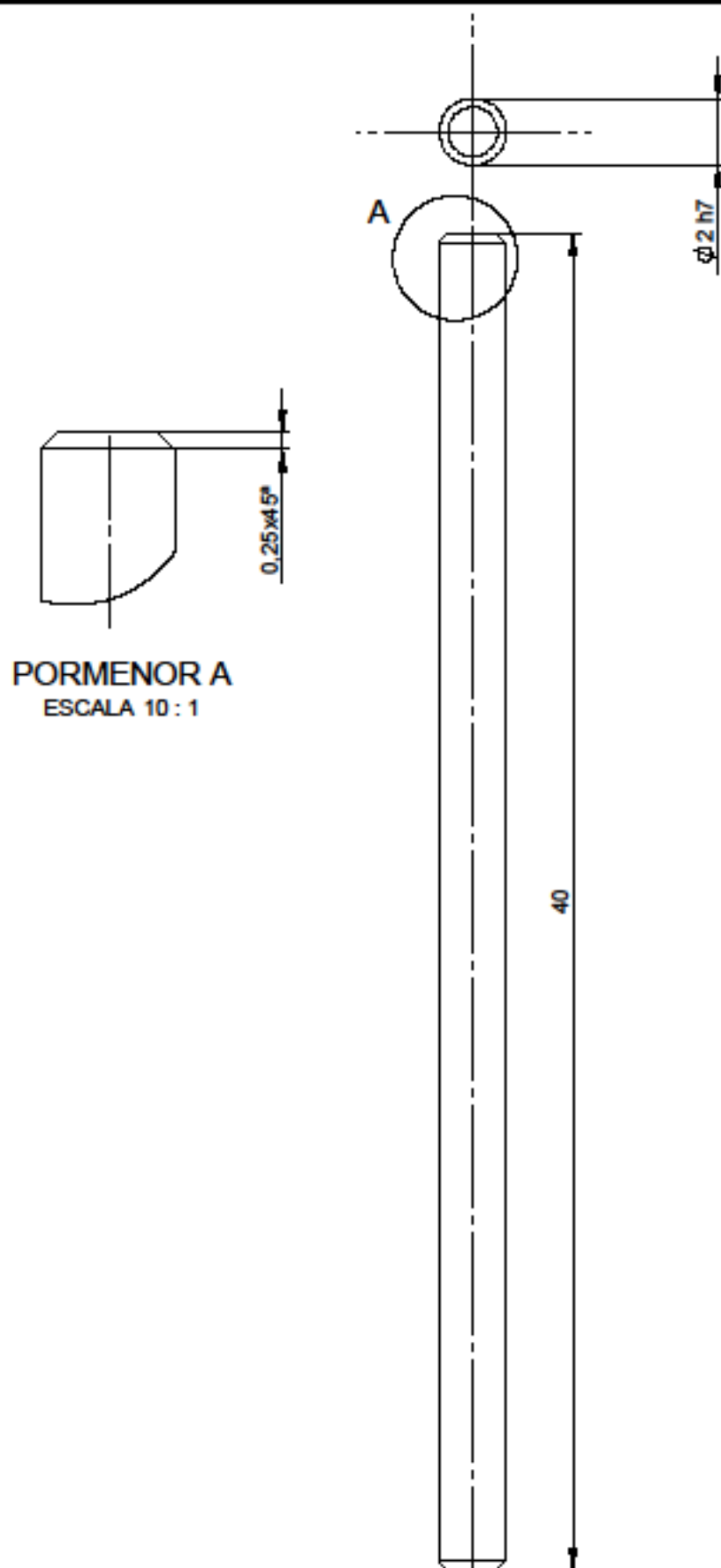
	Proj.			ESTC - IPS, FCT - UNL Delta IPS	Diogo Machado 45698	
	Des.					
	Copiou					
	Visto					
	Escala 1:1 (5:1)	<i>Dobradiça b</i>			DeltaIPS 2019-10	
	Toleran. NP 189-1962 IT 10					

Proj.		
Des.		
Calcular		
Mostrar		

ESTS - IPS, FCT - UNL

Delta IPS

Diogo Machado
45698

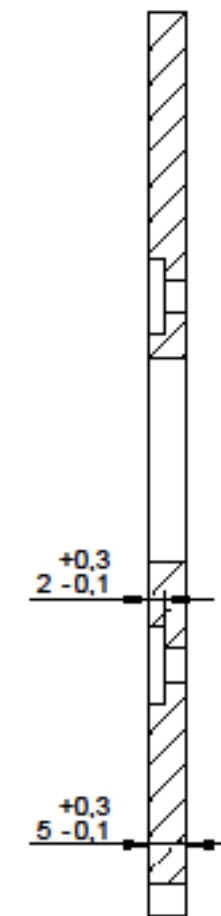
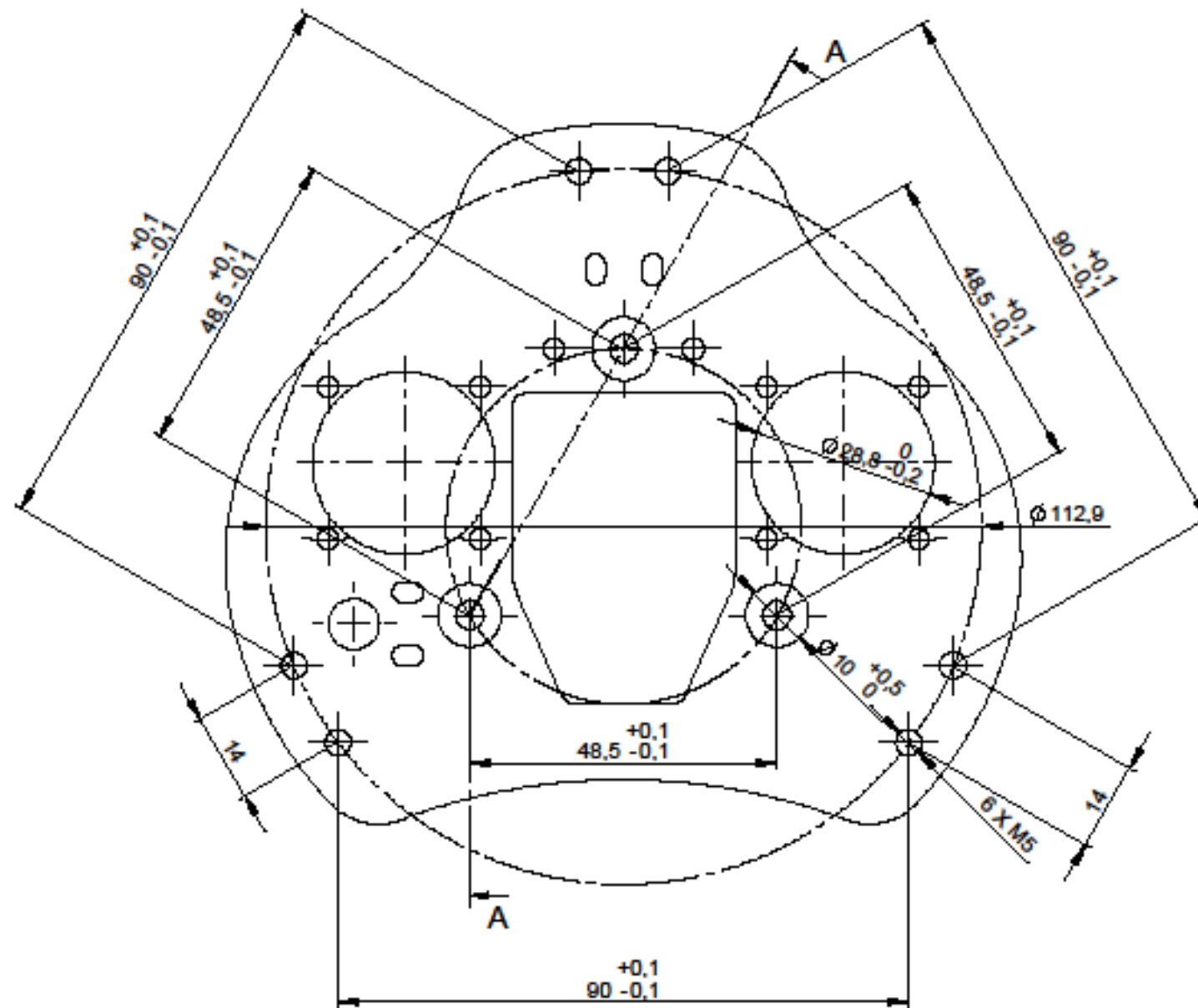


5:1 (10:1)

Toleran.
NP
189:1962
IT 12

*Veio para
dobradiça*

Delta IPS 2019-11



	Proj.			ESTS - IPS, FCT - UNL Delta IPS	Diogo Machado 45698	
	Des.					
	Copiar					
	Visto					
	Escala 1:1	Effector 2.0			DeltaIPS 2019-12	
	Toleran. NP 189:1962 IT 10					